

Miikka Johansson

KAIVANNAISJÄTEALUEEN KOROTTAMINEN, RISKIT JA HAAS- TEET KALVOTETUILLA ALTAILLA

KAIVANNAISJÄTEALUEEN KOROTTAMINEN, RISKIT JA HAAS- TEET KALVOTETUILLA ALTAILLA

Miikka Johansson
Opinnäytetyö
Syksy 2018
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma, yhdyskuntatekniikan suuntautumisvaihtoehto

Tekijä: Miikka Johansson
Opinnäytetyön nimi: Kaivannaisjätealueen korottaminen, riskit ja haasteet kalvotetuilla altailla
Työn ohjaajat: DI Marko Lehmikangas, Pöyry Finland Oy. Lehtori Vesa Kallio, Oulun ammattikorkeakoulu
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2018
Sivumäärä: 69 + 4 liitettä

Kalvotetun kaivannaisjätealtaan patorakenteisiin voi kohdistua kalvon vauriointilanteessa sisäisen eroosion riski, jos hydraulinen gradientti nousee kriittiseksi. Tähän liittyen opinnäytetyössä tarkasteltiin tiivistevaurion aiheuttamaa suotovirtausta ja sisäisen eroosion riskiä kalvotetulla kaivannaisjätealtaalla.

Tarkastelu oli osa Pöyry Finland Oy:n tekemää Terrafame Oy:n kipsisakka-altaan 2 korottamisen riskiarviota. Työssä tutustuttiin myös kalvotettujen kaivannaisjätealtaiden rakenteisiin, altaiden korotusmenetelmiin ja kaivospatoihin liittyviin patoturvallisuusasioihin. Lisäksi työssä käsiteltiin kaivannaisjätteiden ominaisuuksia sekä näiden ominaisuuksien vaikutuksia altaiden korotus- ja sulkemissvaiheessa.

Suotovirtauksen ja hydraulisen gradientin tarkastelu suoritettiin Rocsciencen kehittämällä Slide-ohjelmistolla. Ohjelmistolla suoritettava laskenta perustuu FEM-laskentaan eli elementtimenetelmään. Opinnäytetyössä tutkittiin erilaisissa laskentatapauksissa, tiivistevaurion aiheuttamaa suotoveden määrää ja hydraulista gradienttia. Tiivistevauriot sijoitettiin eri kohtiin kaivannaisjätealtaan patopengertä. Lisäksi näissä vauriokohdissa tutkittiin vauriokoon merkitystä suotovirtauksen ja sisäisen eroosion riskin kannalta.

Tutkimustuloksista kävi ilmi, että kipsisakka-altaaseen läjitetty kipsisakka toimii hyvänä suojakerroksena mahdollisissa vauriointilanteissa. Jos vapaata vettä varastoidaan patopengertä vasten, jo pienikokoinen vaurio aiheuttaa sisäisen eroosion riskin. Patoturvallisuuden kannalta on parempi, jos kipsisakkaa läjitetään patopengertä vasten ja vapaa vesi pidetään kauempana padosta. Suurimman riskin patoturvallisuuden kannalta todettiin olevan haitallisten aineiden kulkeutuminen ympäristöön vuotovesien matkassa.

Asiasanat: kaivosteollisuus, kaivannaisjäte, rikastushiekka-allas, geomembraani, suotovirtaus, hydraulinen gradientti

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree programme in Civil Engineering, Option of Municipal Engineering

Author: Miikka Johansson

Title of thesis: Construction of Staged Tailings Dam, Risks and Challenges on Lined Impoundments

Supervisors: M.Sc. (Tech.) Marko Lehmikangas, Pöyry Finland Ltd.

Lecturer Vesa Kallio, Oulu University of Applied Sciences

Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2018

Pages: 69 + 4 appendices

There is a risk of internal erosion in a case of damage to geomembrane used in lined tailings impoundment. In internal erosion, also known as piping, seepage flow induces a stress condition on particles of soil material and forces them to move with the flowing water.

This thesis was assigned by Pöyry Finland Ltd. The objective was to study the effects of seepage flow and hydraulic gradient it induces in a situation of damaged geomembrane. The evaluation carried out in this thesis was part of a risk analysis, which was conducted to investigate effects caused by sequential rise of a lined tailings impoundment. The tailings impoundment is located in Sotkamo, Finland and the mine, where the impoundment is situated, is operated by Terrafame Ltd.

The evaluation was executed by using Slide analysis program, which is developed by Rocscience. The program uses Finite Element Method in ground water seepage analysis. The evaluation was done to various incidents, and in these incidents geomembrane damage was simulated to various spots of the dam. Additionally in these incidents free water was situated differently with respect to the dam and different puncture sizes were also used.

The results of the evaluation showed, that depositing tailings against the dam and keeping free water at the centre parts of the impoundment, improves dam safety. The most significant risk in case of a damaged geomembrane is spreading of hazardous substances transported by the seepage flow.

Keywords: mining industry, tailings, tailings impoundment, geomembrane, seepage flow, hydraulic gradient

ALKULAUSE

Kiitän Pöyry Finland Oy:n suunnittelupäällikkö Marko Lehmikangasta mielenkiintoisesta opinnäytetyön aiheesta ja työn ohjauksesta. Kiitän häntä myös materiaalin hankkimisen avustamisesta. Lisäksi haluan kiittää lehtori Vesa Kalliota hänen antamistaan neuvoista työn sisällön suhteen.

Oulussa 22.8.2018

Miikka Johansson

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
1 JOHDANTO	8
2 KAIVANNAISJÄTTEEN LÄJITTÄMINEN	9
2.1 Kalvotetut allasrakenteet	10
2.1.1 Geomembraanit eli kalvot	13
2.1.2 Pohjamaa	15
2.1.3 Kalvon alapuolinen kerros	16
2.1.4 Kalvon yläpuolinen kerros	17
2.1.5 Patorakenteet	18
2.2 Altaiden korottaminen	20
2.2.1 Ylävirtaan korotus	21
2.2.2 Alavirtaan korotus	22
2.2.3 Korotus padon keskilinjaan molemmin puolin	23
2.2.4 Tavanomainen, lopulliseen korkeuteen rakennettu pato	23
2.3 Läjitysnopeus	24
2.4 Vedenjohtaminen	24
2.5 Kalvotettujen altaiden kuivatusrakenteet	28
2.6 Patoturvallisuus	29
3 KAIVANNAISJÄTTEEN OMINAISUUKSIA	31
3.1 Rakeisuus	32
3.2 Raemuoto	36
3.3 Vesipitoisuus	37
3.4 Painumaominaisuudet	38
3.5 Vedenläpäisevyys	39
3.6 Plastisuusominaisuudet	40
4 KALVOTETUN KAIVANNAISJÄTEALTAAN KOROTUKSEN HAASTEET	43
4.1 Täytön konsolidaatiopainuma	44
4.2 Huokospaineen kasvu täytössä ja siitä aiheutuvat ongelmat	44

4.3 Altaiden sulkeminen	45
4.4 Täytön kantavuuden parantamiskeinot	46
5 TARKASTELTAVA KAIVANNAISJÄTEALLAS	49
5.1 Kipsisakan ominaisuudet	50
5.2 Kipsisakka-altaan 2 reunapato	54
5.3 Kipsisakka-altaiden 1 ja 2 välipato	55
6 SUOTOVIRTAUKSEN JA HYDRAULISEN GRADIENTIN TARKASTELU	56
6.1 Laskentatapaukset	57
6.1.1 Laskentatapaus 1	57
6.1.2 Laskentatapaus 2	58
6.1.3 Laskentatapaus 3	58
6.1.4 Laskentatapaus 4	59
6.2 Suotovirtaustarkastelun tulokset	59
6.3 Hydraulisen gradientin tarkastelu	60
7 YHTEENVETO	64
LÄHTEET	65
LIITTEET	
Liite 1 Kipsisakka-altaan 2 reunapadon tyyppipoikkileikkaus	
Liite 2 Kipsisakka-altaiden 1 ja 2 välipadon tyyppipoikkileikkaus	
Liite 3 Suotovirtauslaskenta Slide-ohjelmalla	
Liite 4 Suotovirtauslaskennan tulosteet	

1 JOHDANTO

Kaivannaisjätealtaissa täytön paksuus voi kasvaa paikoin nopeasti eikä täyttö ehdi painua kuormituksen kasvun mukaisesti. Tämä voi aiheuttaa huokospaineen kasvun täytössä, mikä heikentää täytön kantavuutta ja stabiliteettia altaiden korotusvaiheessa. Mikäli altaassa ei ole kunnollisia kuivatusrakenteita, pehmeän täytön heikko kantavuus hankaloittaa altaiden sulkemista merkittävästi.

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan tiivistevaurion aiheuttamaa suotovirtausta ja hydraulista gradienttia kalvotetussa kaivannaisjätealtaassa. Tarkastelun kohteena on Sotkamossa sijaitsevan Terrafame Oy:n kaivoksen ja metallitehtaan kipsisakka-altaan 2 patopenger. Tarkastelu on osa Pöyry Finland Oy:n tekemää kipsisakka-altaan 2 korotuksen riskiarviota.

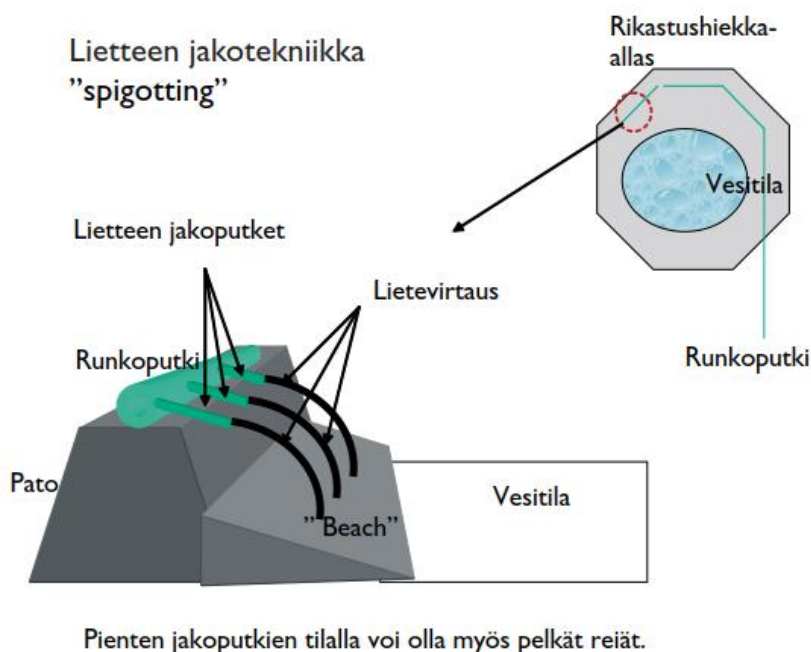
Tarkastelussa käytetään Rocsciencen kehittämää Slide-ohjelmistoa. Ohjelmiston avulla suoritettava suotovirtauksen ja hydraulisen gradientin laskenta perustuu FEM-laskentaan eli elementtimenetelmään. Tarkastelussa käsitellään eri laskentatapauksissa tapahtuvien, eri kohtiin sijoittuvien ja eri kokoisten tiivistevaurioiden aikaan saamia suotovesimääriä ja hydraulista gradienttia. Hydraulisen gradientin noustessa yli maalajille määritetyn kriittisen rajan maa-ainekseen syntyy sisäisen eroosion riski. Tällöin hienoaaines voi lähteä suotovirtauksen mukana kulkeutumaan.

Lisäksi opinnäytetyössä käsitellään kaivannaisjätteen läjittämistä keinotekoisilla geomembraaneilla tiivistetyillä altailla sekä tarkastellaan tyypillisiä kalvotettuja allasrakenteita, allasalueiden korottamista, vedenjohtamista, altaiden kuivatusrakenteita ja patoturvallisuutta. Tarkoituksena on myös tutustua kaivannaisjätteiden ominaisuuksiin sekä niiden vaikutuksiin altaiden korotus- ja sulkemisvaiheessa.

2 KAIVANNAISJÄTTEEN LÄJITTÄMINEN

Altaisiin läjitettävät kaivannaisjätteet koostuvat malmista mineraalien erottamisen seurauksena jäävistä hiukkasista tai rakeista, joita yleensä kutsutaan rikastushiekaksi tai erilaisiksi sakoiksi. Kaivannaisjäte sisältää yleensä myös prosessivettä ja -kemikaaleja sekä mahdollisesti mineraaleja, joita ei ole saatu rikastusprosessissa erotettua. Läjitetävät ainekset vaihtelevat eri kaivosten sekä malmi- ja mineraaliesiintymien mukaan. (Himmi 2007, 37; Saarela 1990, 11.)

Läjitetävä aines viedään usein altaaseen vesilietteenä pumppaamalla, minkä vuoksi se lajittuu eli rikastushiekan karkeampi osa jää altaan reunoille ja jätteen hienoaines kulkeutuu veden mukana keskeemmälle allasta. Kuvassa 1 on esitettyä lietteen jakotekniikka, niin sanotun ”spigotauksen” periaate. Rikastushiekkaliete voidaan purkaa tasaisesti altaan ympäriltä, jolloin vapaa vesipinta muodostuu keskiosaan allasta. Rikastushiekkaliete on myös mahdollista purkaa yksittäisestä kohdasta, jolloin vapaa vesipinta muodostuu vastakkaiselle puolelle purkukohtaa. Näiden purkutapojen lisäksi kaivannaisjäte voidaan läjittää altaaseen hydrosyklonoinnin avulla. (European Commission 2009, 80; Sivonen – Frilander 2001, 21.)



KUVA 1. Rikastushiekkalietteen jakotekniikka (Himmi 2007, 42)

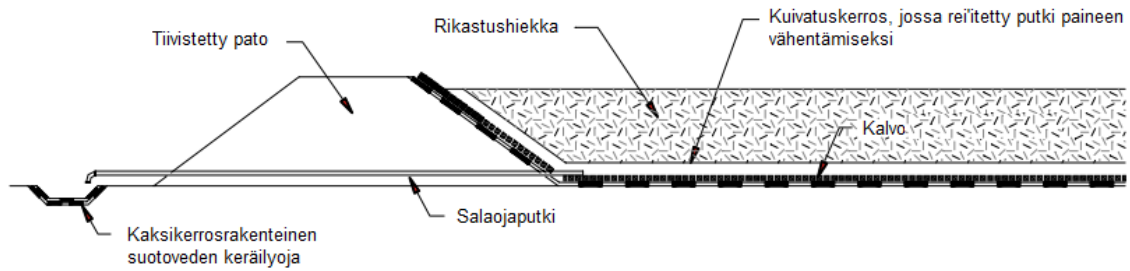
2.1 Kalvotetut allasrakenteet

Kaivosalueet ovat usein todella laajoja, jopa satojen hehtaarien suuruisia. Niinpä ympäristönsuojelutoimenpiteiden täytyy olla käytännöllisiä, kestäviä ja ympäristön huomioon ottavia. Tämän seurauksena geosynteettisten tuotteiden käyttö kaivosteollisuudessa on lisääntynyt viime vuosikymmenten aikana, sillä käsitys niiden käyttäytymisestä kaivostoiminnassa on parantunut. (Touze-Foltz – Lupo – Barroso 2009, 2.)

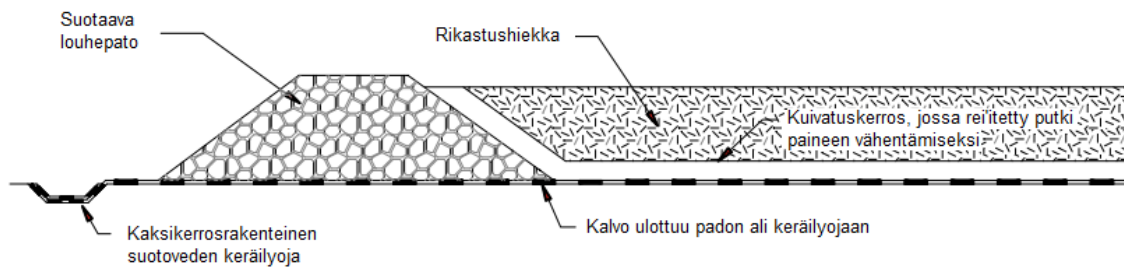
Geosynteettisiä tuotteita käytetään nykyisin kasaliuotuksen, kaivannaisjätealtaiden, sivukivivarastojen ja kalvotettujen keräilyaltaiden ja -ojien suunnitteluun ja rakentamiseen. Geosynteettisiä kalvorakenteita on myös käytetty rikastamoiden yhteydessä ja kaivosalueilla estämään kaivostoiminnassa käytettyjen liuosten, kemikaalien ja öljypohjaisten aineiden kulkeutuminen ympäristöön. (Touze-Foltz ym. 2009, 2.)

Käytettäessä geosynteettisiä tuotteita kaivosteollisuudessa täytyy huomioida kaivostoiminnasta mahdollisesti aiheutuvat suuret kuormitukset, jotka voivat olla suuruudeltaan jopa 3,5 MPa. Kalvorakenteiden käytössä täytyy ottaa huomioon myös suurten koneiden aiheuttamat dynaamiset kuormitukset ja altaissa olevat suuret hydrostaattiset paineet. (Touze-Foltz ym. 2009, 2.)

Kuvassa 2 on Davies – Lighthall – Rice – Martinin (2002, 9) esittämät kalvotetun altaan kaksi periaatteellista leikkauskuvaa. Leikkaus a:ssa kalvo ulottuu padon harjalle saakka vaatien huolellisesti tehdyn salaojaputken läpiviennin. Leikkaus b:ssä kalvo ulottuu padon ali keräilyjojan. Kalvon ulottuessa padon alle täytyy ottaa huomioon alustan leikkauslujuus kuivan luiskin puolella, koska kalvo voi muodostaa sinne murtokohdan.



a) Kalvotettu allas ja pato




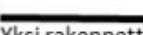
b) Kalvotettu allas ja suotaava pato


KUVA 2. Periaatteelliset leikkaukset kalvotetuista altaista, joissa on salaojitus (muokattu Davies ym. 2002, 9)


Kaivannaisjätealtaiden rakenteissa on käytetty monenlaisia ratkaisuja ja ne vaihtelevat kohteen mukaan. Rakennerratkaisut on jaettu pohjaveden suojelun kannalta viiteen ryhmään sen mukaan, onko suojauksessa yksi heikosti johtava kerros vai usean kerroksen yhdistelmäratkaisu. Ratkaisut ovat esitettynä kuvassa 3 muokattuna Australian Environmental Protection Agency (1995) ja European Commission (2009) esittämistä ratkaisuista. Jokaisen tapauksen tarkoitus on estää suotovesien pääsyä altaan alapuoliseen maaperään ja sitä kautta ympäristöön. (Tuomela 2016, 13.)


1. Yhden kerroksen ratkaisut

a)  Luonnollisesti heikosti vettä johtava maa tai ehjä kallio

b)  Yksi rakennettu heikosti vettä läpäisevä kerros

c)  Yksi rakennettu heikosti vettä läpäisevä kerros alapuolisella suojakerroksella

d)  Yksi rakennettu heikosti vettä läpäisevä kerros yläpuolisella suojakerroksella

e)  Yksi rakennettu heikosti vettä läpäisevä kerros yläpuolisella ja alapuolisella suojakerroksella

2. Yhden kerroksen ratkaisut vedenpaineen kontrolloinnilla

a) 

b) 

c) 

d) 

e) 

3. Yhdistelmäratkaisut sekä vedenpaineen kontrolloinnilla että ilman

a)  Geomembraani luonnollisesti heikosti vettä johtavan maa tai ehjän kallion päällä

b)  Geomembraani heikosti vettä läpäisevä kerroksen päällä

c) 

d) 

e) 

4. Kaksoiskerrosratkaisu nesteen keräysjärjestelmällä

a) 

b) 

c) 


d) 

e) 


5. Kuivatus kaksoiskerrosratkaisun yläpuolella

a) 

b) 

c) 

d) 

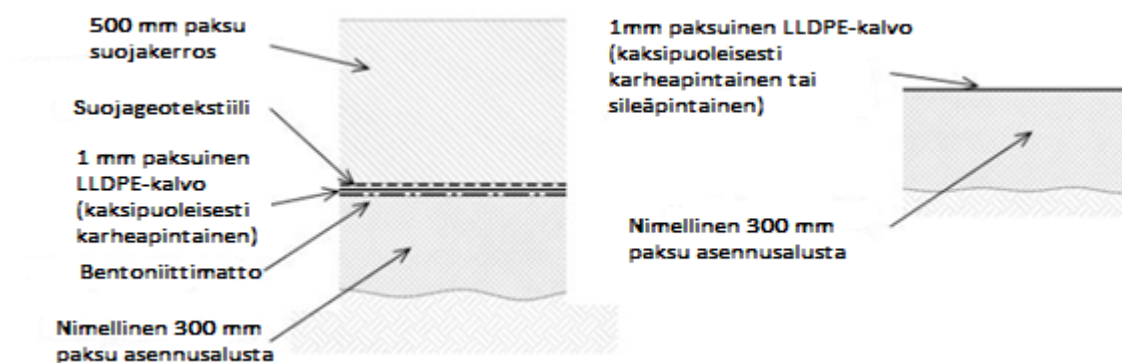
e) 

Selite

-  Luonnollisesti heikosti vettä johtava kerros maata tai kalliota
-  Heikosti vettä johtava kerros
-  Suojakerros
-  Vedenpaineen kontrollointi kerros
-  Nesteen keräys ja poisto

KUVA 3. Periaatteelliset pohjarakenneratkaisut pohjaveden suojaamiseksi muokattuna Australian Environmental Protection Agency (1995) ja European Commission (2009) esittämistä ratkaisuista (Tuomela 2016, 14)

Käytetyistä kalvotetuista rakenteista esimerkkinä ovat kuvassa 4 esitetyt Swakop Uraniumin omistamalle Husabin uraanikaivokselle tehdyt rikastushiekka-altaan rakenteet. Alueilla, joihin tulee muita rakenteita, kuten alkupato, kokoojaoja, putkikaivantoja, dekantointikaivoja ja pengertie, tehdään kalvon päälle lisäsuojaukset. Näillä alueilla kaksipuoleisesti karheapintaisen LLDPE-kalvon päälle asennettavaksi on suunniteltu suojageotekstiili sekä 500 mm paksu suojakerros. Lisäksi kalvon alle tulee bentoniittimatto. Muuten käytetään sileäpintaista tai kaksipuoleisesti karheapintaista LLDPE-kalvoa, joka asennetaan 300 mm paksun asennusalustan päälle. (Cole – Walls – Collins 2014, 15.)



KUVA 4. Husabin uraanikaivoksen rikastehiekka-altaan kalvotetut rakenteet (muokattu Cole ym. 2014, 15)

2.1.1 Geomembraanit eli kalvot

Kaivosteollisuudessa pohjarakenteiden tiivisteinä käytetään usein HDPE:stä eli korkeatiheyksisestä polyeteenistä, LLDPE:stä eli matalatiheyksisestä polyeteenistä, PP:stä eli polypropeenista, PVC:stä eli polyvinyylikloridista, EPDM:stä eli synteettisestä vulkanoidusta kumimateriaalista ja EIA:sta eli eteenistä valmistetusta polymeeriseoksesta valmistettuja kalvoja. Suomessa kaivannaisjätealtaiden pohjarakenteissa on käytetty myös BGM:stä eli bitumigeomembraanista valmistettua kalvoa. Usein käytettävien geomembraanien edut ja heikkoudet Scheirsin (2009) mukaan täydennettynä Breul – Reinson – Eldreidge – Stenson (2006) ja Cuning – Reinson (2008) raportointien bitumigeomembraanin ominaisuuksilla ovat taulukossa 1. (Tuomela 2016, 10.)

TAULUKKO 1. Usein käytettävien geomembraanien edut ja heikkoudet
Scheirsin (2009) mukaan täydennettynä Breul - Reinson - Eldreidge – Stensonin (2006) ja Cuning - Reinsonin (2008) raporttoimien bitumigeomembraanin ominaisuuksilla (Tuomela 2016, 11)

Geomembraani	Edut	Heikkoudet
HDPE	<ul style="list-style-type: none"> - Laaja kemikaalikestävyys - Hyvä hitsaussaumojen kestävyys - Kestää matalia lämpötiloja 	<ul style="list-style-type: none"> - Jännityshalkeamat mahdollisia - Lämpölaajenee - Reikiintyy herkästi - Kestää huonosti jännityksiä useasta suunnasta
LLDPE	<ul style="list-style-type: none"> - Joustavampi kuin HDPE - Helpompi levittää kuin HDPE - Kestää hyvin jännityksiä useasta suunnasta 	<ul style="list-style-type: none"> - Huonompi UV-kestävyys kuin HDPE:llä - Huonompi kemikaalikestävyys kuin HDPE:llä
fPP	<ul style="list-style-type: none"> - Voidaan valmistaa ja taittaa tehtaalla, joten vähemmän kentällä tehtyjä saumoja - Kiitettävät moniaksiaaliset venymäominaisuudet - Laaja lämpötilaikkuna saumojen tekemiselle 	<ul style="list-style-type: none"> - Rajoitettu kestävyys hiilivedyille ja klooratulle vedelle
PVC	<ul style="list-style-type: none"> - Hyvä työstettävyys ja levitettävyys - Helppo saumata - Voidaan taittaa, joten vähemmän kentällä tehtyjä saumoja 	<ul style="list-style-type: none"> - Huono UV- ja otsonikestävyys - Ikääntyy helposti - Toiminta heikompaa korkeissa ja matalissa lämpötiloissa
BGM	<ul style="list-style-type: none"> - Voidaan käyttää vaikeissa ilmasto-olosuhteissa - Peittomateriaalin laatu ei ole yhtä kriittinen kuin HDPE:llä ja LLDPE:llä - Painavana voidaan asentaa tuulisella ilmalla - Asentamiseen tarvitaan vain hitsauspoltin ja tela 	<ul style="list-style-type: none"> - Painavampi ja paksumpi (voi olla myös etu) - Bitumin kemikaalikestävyys
EPDM	<ul style="list-style-type: none"> - Hyvä UV- ja otsonikestävyys - Kestävää ja venyvää - Levitettävyys - Voidaan käyttää kylmissä olosuhteissa 	<ul style="list-style-type: none"> - Kestävyys hiilivedyille ja liuottimille - Sauman laatu

Touze-Foltz ym. (2009, 29) ovat laatineet Lupo – Morrisonin (2007) tekemän taukukon pohjalta ohjeellisen valintataulukon (taulukko 2), jota voidaan käyttää valitessa HDPE- tai LLDPE-kalvoa. Taulukossa otetaan huomioon perustamisolosuhteet eli maaperän kantavuus, alapuolisen asennusalustan rakeisuus, yläpuolisen materiaalin rakeisuus sekä kalvoon kohdistuva kuormitus.

TAULUKKO 2. Ohjeellinen valintataulukko Lupo – Morrisonin (2007) kehittämän taulukon pohjalta (Touze-Foltz ym. 2009, 29)

Perustamis- olosuhteet ¹	Alapuolinen asennus- alusta ²	Yläpuolinen materiaali ³	Kalvoon kohdistuva tehokas normaali jännitys (MPa)*		
			<0,5	0,5< <1,2	>1,2
Kantava tai korkea lujuus	Karkea- rakeinen	Karkearakeinen	2 mm LLDPE tai HDPE	2 mm LLDPE tai HDPE	2,5 mm LLDPE tai HDPE
		Hienorakeinen	1,5 mm LLDPE tai HDPE	2 mm LLDPE tai HDPE	2,5 mm LLDPE tai HDPE
	Hieno- rakeinen	Karkearakeinen	1,5 mm LLDPE tai HDPE	1,5 mm LLDPE tai HDPE	2 mm LLDPE tai HDPE
		Hienorakeinen	1 mm LLDPE tai HDPE	1,5 mm LLDPE tai HDPE	2 mm LLDPE tai HDPE
		Karkearakeinen	2 mm LLDPE	2 mm LLDPE	2,5 mm LLDPE
		Hienorakeinen	1,5 mm LLDPE	2 mm LLDPE	2,5 mm LLDPE
Pehmeä tai alhainen lujuus	Karkea- rakeinen	Karkearakeinen	2 mm LLDPE	2 mm LLDPE	2,5 mm LLDPE
		Hienorakeinen	1,5 mm LLDPE	2 mm LLDPE	2,5 mm LLDPE
	Hieno- rakeinen	Karkearakeinen	2 mm LLDPE	2 mm LLDPE	2,5 mm LLDPE
		Hienorakeinen	1,5 mm LLDPE	2 mm LLDPE	2,5 mm LLDPE

¹Perustamisolosuhteiden määritelmä on suhteellinen lujuuden mitta. Perustamisolosuhteet täytyy tutkia ja testata määrittäessä yhteensopivaa kalvoa

²Alapuolisella asennusalustalla tarkoitetaan maata, joka on suorassa kosketuksessa kalvon alapinnan kanssa. Yhteensopivaa kalvoa määrittäessä on tarpeen tehdä kokeita ja mitoituslaskelmia

³Yläpuolisella materiaalilla tarkoitetaan materiaalia, joka tulee suoraan kalvon päälle. Yhteensopivaa kalvoa määrittäessä on tarpeen tehdä kokeita ja mitoituslaskelmia

*Tehokas normaalijännitys on kalvolle kohdistuvan jännityksen enimmäisarvo, joka johtuu läjitettävästä aineksestä

2.1.2 Pohjamaa

Kantava pohjamaa tai perusta on olennainen osa kalvotettua rakennetta, varsinkin jos kalvorakenne tulee olemaan suuren kuormituksen alainen. Kantava perusta minimoi kuormanalaisia painumia, jotka mahdollisesti aiheuttaisivat kalvoon vaurioita. Pohjatutkimuksilla määritetään pohjamaan ominaisuudet. Jos pohjamaassa ilmenee pehmeitä alueita, kuten savikerroksia ja konsolidoitumattomia

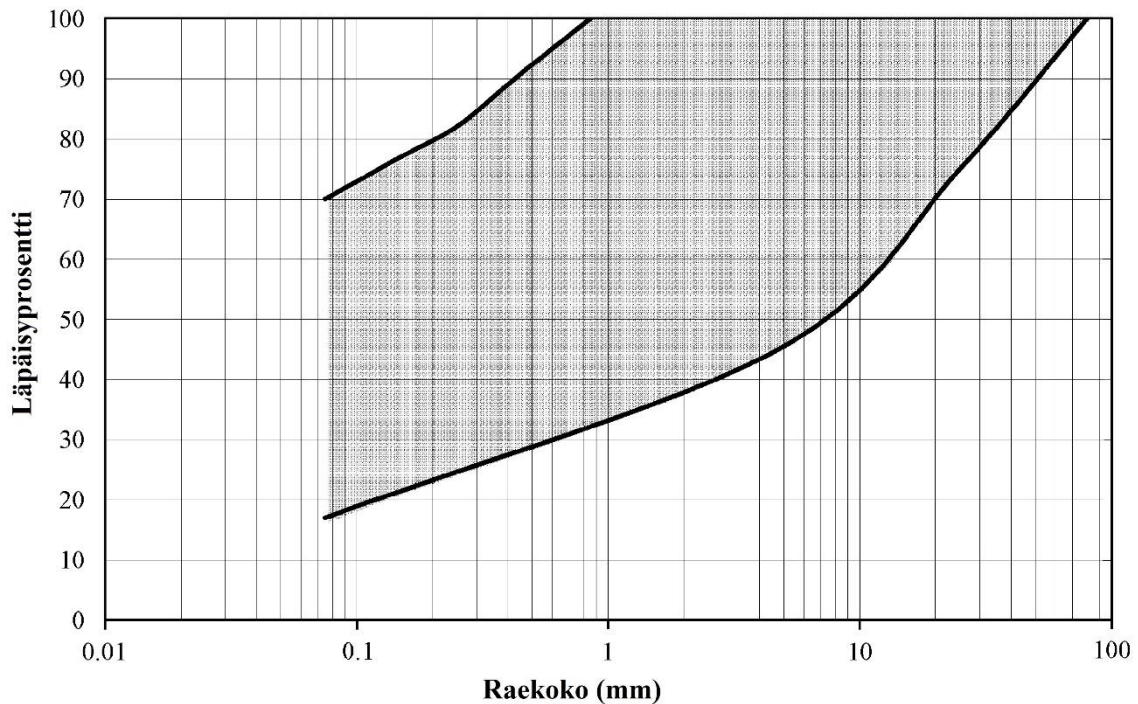
maakerroksia, suunniteltavaa läjitysaluetta tulee muuttaa tulevien kuormitusten vähentämiseksi tai rajoittamiseksi. (Lupo – Morrison 2007, 97.)

Maaperäolosuhteiden määrittämiseen tulisi sisällyttää niin maasto- kuin laboratoriotutkimuksia. Maastotutkimuksiin voi kuulua geofysikaalisia menetelmiä sekä erilaisia kairausmenetelmiä, kuten CPTU-kairaukset ja koekuoppien kaivu. Tyypillisiin laboratoriotutkimuksiin voivat kuulua kolmiaksaalikokeet, suora leikkauskoe sekä ödometrikoe. (Lupo – Morrison 2007, 97.)

2.1.3 Kalvon alapuolinen kerros

Kalvon alapuolisen materiaalin tulisi olla painumaton ja riittävän tasainen, jotta kalvo ei vaurioidu läjitettävän aineksen aiheuttamasta kuormituksesta. Kalvon alapuoliselle materiaalille onkin Lupo – Morrison (2007, 99) esittäneet yleisesti vaadittuja ominaisuuksia. Materiaalin raekoon tulisi olla enintään 38 mm, raekokojakauman tasaisesti jakautunut, hienoainespitoisuuden korkea (yli 15 % alle 0,074 mm raekoon), plastisuusluvun yli 15 ja kyllästyneen tilan vedenjohtavuuden enintään $1 \cdot 10^{-8}$ m/s. (Kauppila – Räisänen – Myllyoja 2011, 111; Lupo – Morrison 2007, 99.)

Kalvon alapuolisen kerroksen materiaalina on yleensä kivetön moreeni, kivituhka tai hiekka. Kuvassa 5 näkyy asennusalustan tyypillinen raekokojakauma. Kalvon alle voidaan asentaa bentoniittimatto vahvistukseksi pienentämään vedenjohtavuutta ja kalvon vaurioitumisriskiä, mutta tällöin täytyy ottaa huomioon bentoniittimaton viruminen, kokoonpuristuvuus ja sisäinen leikkauslujuus. (Kauppila – Räisänen – Myllyoja 2011, 111; Lupo – Morrison 2007, 99.)



KUVA 5. Alapuolisen asennusalustan tyypillinen raekokojakauma (muokattu Lupo – Morrison 2007, 100)

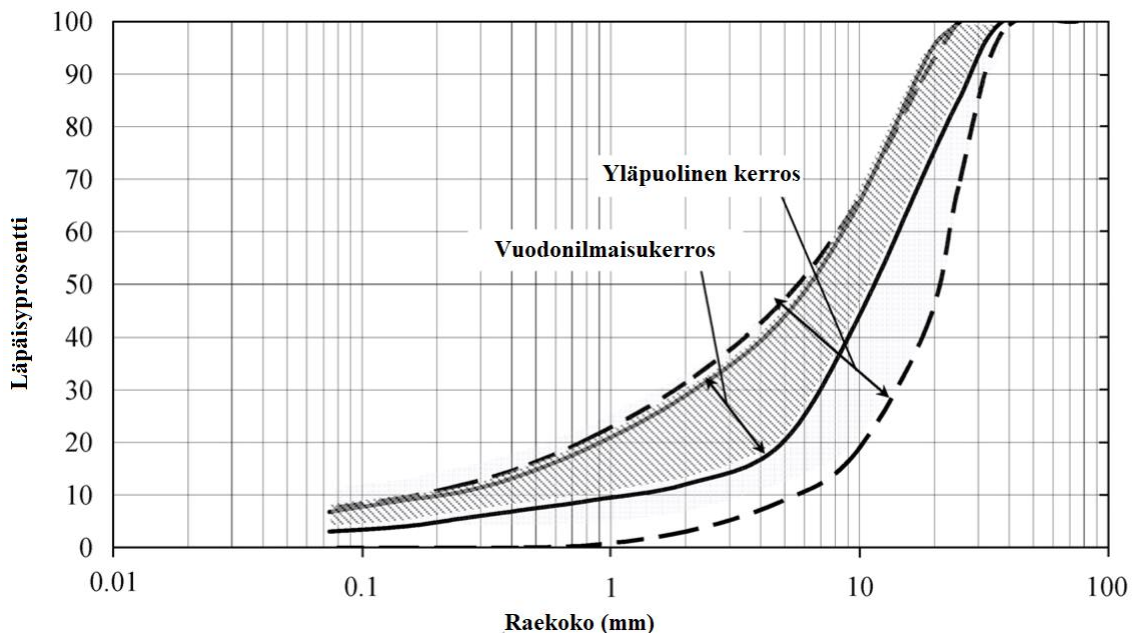
2.1.4 Kalvon yläpuolinen kerros

Kalvon yläpuolinen kerros voi koostua yhdestä tai useammasta eri kerroksesta. Suojakerros suojaa alapuolista kalvoa mahdollisilta vaurioilta. Vuodonilmaisukerroksella hallitaan kaksoiskerrosratkaisun alempaan kalvoon kohdistuvaa hydraulista gradienttia. Tärkeä osa kalvon yläpuolista kerrosta on kuivatuskerros, joka mahdollistaa kalvon yläpuolisen kuivatuksen (kuva 3). (Lupo – Morrison 2007, 102.)

Suojakerros voi olla hiekkaa ja soraa tai murskettä, siltistä maata tai joissain tapauksissa savista maata. Suojakerroksessa voidaan käyttää myös geotekstiilejä, kuitenkin huomioiden rajapinnan stabiliteetin. Suojakerroksen paksuus määritetään yleensä käyttäen tavanomaisia kuormalaskentoja. Suojakerroksen paksuus voi vaihdella merkittävästi riippuen tulevasta kuormituksesta. (Lupo – Morrison 2007, 102.)

Kuivatuskerros voi olla erillinen osa kalvon yläpuoleista kerrosta tai se voi olla sisäänrakennettuna suojakerroksessa. Kuivatuskerroksia käytetään usein

kasaliuotuksen, rikastehiekka-altaiden ja sivukivivarastojen rakenteissa prosessiliuosten ja -uutteiden keräykseen. Kuivatuskerros on yleensä seulottua luonnonhiekkaa, soraa tai murskettä. Kuivatuskerroksen tyypillinen raekokojakauma on esitettyä kuvassa 6. Kuivatuskerroksen materiaalin täytyy olla lajittunut, jotta saavutetaan haluttu vedenjohtavuus sekä kuormituksenlaiset leikkauslujuusominaisuudet samalla minimoiden kalvoon kohdistuvat vauriot. Kuivatuskerroksen toimivuuden tehostamiseksi voidaan käyttää polyeteenistä (PE) valmistettuja kuivatusputkia. (Lupo – Morrison 2007, 102.)



KUVA 6. Kuivatuskerroksen tyypillinen raekokojakauma (muokattu Lupo – Morrison 2007, 103)

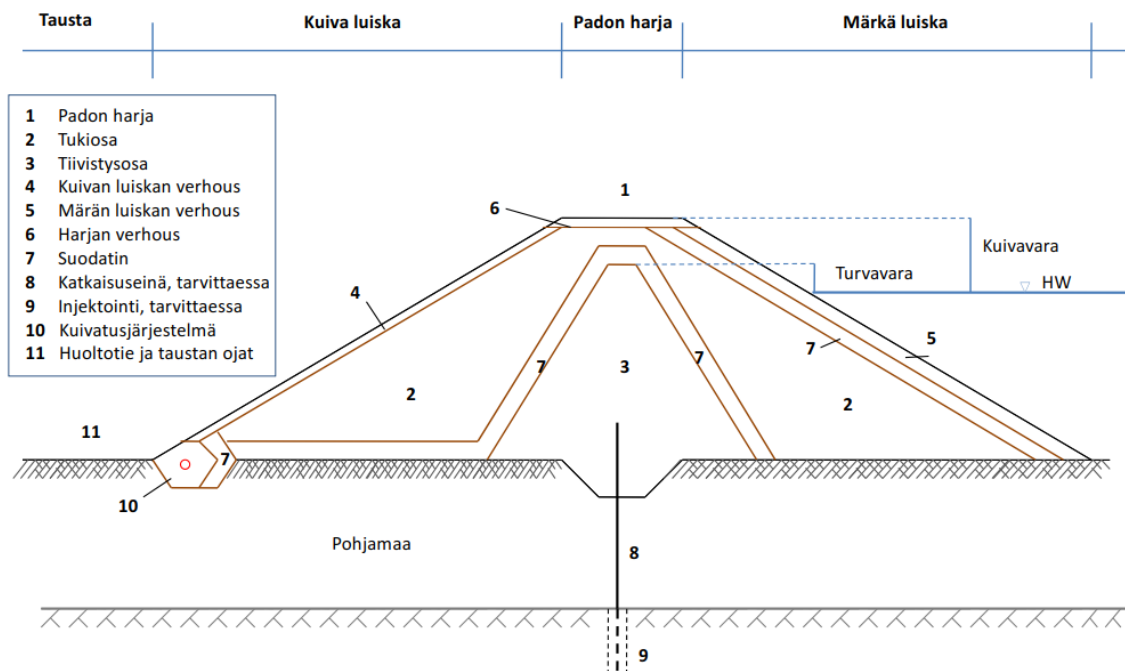
2.1.5 Patorakenteet

Kaivospadot ovat tyypillisesti maa- tai louhepatoja. Maapadot voidaan jakaa homogeenisiin ja vyöhykepatoihin. Homogeeniset maapadot on etupäässä rakennettu yhdestä heikosti vettä läpäisevästä materiaalista. Sen sijaan vyöhykepadot on rakennettu useasta eri materiaalista, joilla on eri vedenläpäisevyyskyky. Louhepatoihin voidaan käyttää kaivoksella syntyviä sivukiviä, mikä vähentää kustannuksia verrattuna homogeeniseen maapatoon sekä vyöhykepatoon. Patotyyppien etuja ja haittoja on esitettyä taulukossa 3. (Kauppila ym. 2011, 111.)

TAULUKKO 3. Maapatotyyppien etuja ja haittoja (Leskelä 2005, 22)

Patotyyppi	Edut	Haitat
Homogeeninen pato	<ul style="list-style-type: none"> - Selkeä rakentaa - Tiivistyksen valvonta helpoa 	<ul style="list-style-type: none"> - Suuremmat massat - Kuivan luiskan vettymisriski
Vyöhykepato	<ul style="list-style-type: none"> - Voidaan käyttää useita materiaaleja erilaisissa suhteissa - Kokonaismassat yleensä homogeenista rakennetta pienempiä - Jotkut tyypit voidaan rakentaa osittain talvella 	<ul style="list-style-type: none"> - Työn valvonta vaativampaa - Materiaalien rajapinnoissa suodatinkriteerit tärkeitä - Erilaiset muodonmuutosominaisuudet voivat aiheuttaa ongelmia
Louhepato	<ul style="list-style-type: none"> - Varsinkin keinomateriaaleilla tiivistettynä kestävät mm. nopeiden vedenpinnan vaihteluiden aiheuttamat kuormitukset - Pienin tilantarve - Erikoisrakentein voidaan sallia ylivirtaus 	<ul style="list-style-type: none"> - Vaativat kantavan pohjan - Materiaalin hankinta joskus kallista (ei yleensä kaivoksilla)

Kaivannaisjätealtaiden alkupato tehdään yleensä moreenista ja louheesta. Kaivospadoissa rakennusmateriaaleina on käytetty myös murskettä, soraa, hiekkaa ja savea riippuen kaivoksesta ja saatavilla olevasta materiaalista. Maapadon tyyppipoikkileikkaus ja sen rakenteelliset osat ovat esitettynä kuvassa 7. (Kaupila ym. 2011, 111; Sivonen – Frilander 2001, 21-22.)



KUVA 7. Maapadon tyyppipoikkileikkaus ja sen rakenteelliset osat (Isomäki – Maijala – Sulkakoski – Torkkel 2012, 64)

2.2 Altaiden korottaminen

Kaivospatoja korotetaan yleensä vaiheittain kaivannaisjätealtaan läjitystilavuuden lisäämiseksi. Padot voidaan myös rakentaa lopulliseen korkeuteen tavanomaiseen tapaan. Korotettujen patojen rakentamiseen on käytetty louhetta, altaassa olevaa rikastushiekkaa, mursketta, soraa, moreenia, hiekkaa ja savea. Mikäli rikastushiekkaa käytetään padon korotukseen, siirretään altaassa olevaa rikastushiekkaa etukäteen padon päälle, jotta se kuivuisi ennen padon korotuksen rakentamista. Vaihtoehtoisesti altaasta voidaan kuivattaa se alue, josta rikastushiekkaa otetaan padon korotusmateriaaliksi. (Kauppila ym. 2011, 114; Siivonen – Frilander 2001, 21.)

Kaivospadon korotus voidaan tehdä kolmella eri tavalla: korottamalla patopengertä sisäänpäin altaaseen eli ylävirtaan, korottamalla patopengertä ulospäin altaasta eli alavirtaan tai korottamalla patopenkereen keskilinjan molemmin puolin. (Saarela 1990, 12.)

Taulukossa 4 esitetään eri padon rakennus- ja korotusmenetelmien vertailu, jossa huomioidaan rikastushiekan soveltuvuus korotukseen, rikastushiekan

läjitystapa, menetelmän sopivuus vedenvarastointiin, rajoitukset korotusnopeuteen, käyttökelpoiset rakennusmateriaalit, maanjäristyskestävyys sekä suhteelliset kustannukset. (European Commission 2009, 391.)

TAULUKKO 4. Padon rakennusmenetelmien vertailutaulukko (European Commission 2009, 391)

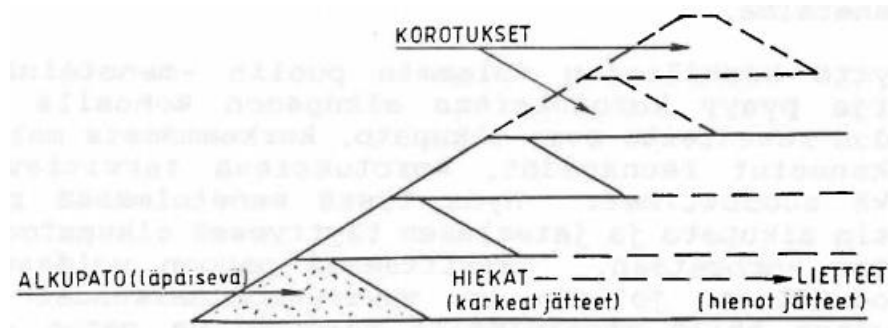
	Tavanomainen tai vedenpitävä	Ylävirtaan	Alavirtaan	Keskilinja
Soveltuvuus	Sopii kaikentyyppisille rikastushiekoille	Vähintään 40-60% karkeaa (0,075-4 mm) rikastushiekasta ¹ . Lajittunut altaaseen	Sopii kaikentyyppisille rikastushiekoille	Karkeaa tai pienen plastisuuden omaavaa hienoainesta
Läjitystapa	Mikä tahansa menetelmä	Tasainen läjitys altaan ympäri. Vaatii hallitun rikastushiekka-altaan kuivan osan. Altaan keskeltä läjitys sakeutetulla rikastushiekalla	Riippuu suunnitelmaratkaisuista	Tasainen läjitys altaan ympäri
Sopivuus vedenvarastointiin	Hyvä	Soveltuu tietyissä olosuhteissa	Hyvä	Pysyvä varastointi ei suositeltavaa. Voidaan suunnitella väliaikaiseen ylimäärävesien varastointiin
Korotusnopeuden rajoitukset	Ei ole riippuvainen rikastushiekan ominaisuuksista	Vähemmän kuin 5 m/a suotavaa, jotta välttyään vajavaiselta konsolidoitumiselta ja huokospaineen kasvulta	Ei ole	Rajoituksia yksittäisiin korotuksiin voi olla
Rakennusmateriaali	Luonnon maa-aines, louhe	Luonnon maa-aines, karkea rikastushiekka, sivukivi	Karkea rikastushiekka tai muu kaivannaisjäte, jos tuotantoteho on riittävä, muuten luonnon maa-aines	Karkea rikastushiekka tai muu kaivannaisjäte, jos tuotantoteho on riittävä, muuten luonnon maa-aines
Maanjäristyskestävyys	Hyvä	Heikko seismisesti aktiivisilla alueilla	Hyvä	Tyydyttävä
Suhteelliset kustannukset	Korkeat	Alhaiset	Korkeat	Kohtuulliset

¹Ei koske sakeutettua rikastushiekkaa

2.2.1 Ylävirtaan korotus

Kuvassa 8 esitetty ylävirtaan täyttö on korotustavoista yleisimmin käytetty. Tämä korotustapa soveltuu käytettäväksi silloin, kun läjitetty kaivannaisjäte on

käyttökelpoista eli riittävän karkeaa käytettäväksi padon korotuksessa ja silloin, kun padon korotuskorkeus ei ole kovin suuri. Ylävirtaan korotus on myös edullisin ja yksinkertaisin rakentaa. Altaan täytyessä padon korotus tehdään osittain ole-massa olevan padon ja osittain altaaseen läjitetyn kaivannaisjätteen päälle. Täl-löin kaivannaisjätealtaasta tulee korkeampi, mutta samalla altaan pinta-ala pie-nenee padon harjan siirtyessä sisäänpäin allasta. (Saarela 1990, 12-13.)



KUVA 8. Kaivospadon korotus ylävirtaan (Saarela 1990, 13)

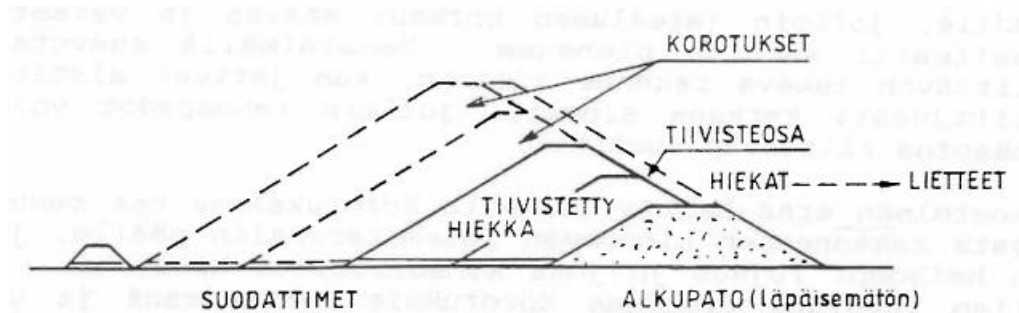
Ylävirtaan korottaessa ongelmana on kaivannaisjätteen heikko kantavuus ja sen hidas konsolidoituminen eli kokoonpuristuvuus. Tästä johtuen padon korkeutta pitää rajoittaa ja vapaa vesipinta täytyy viedä riittävän kauaksi padosta, jotta riit-tävän suuruinen stabiliteetti säilyy. Suotovesipinnan hallinta on myös ongelmana tässä korotustavassa. (Saarela 1990, 13.)

Ylävirtaan korotetun padon kuivaluiskan kaltevuuden olisi hyvä olla vähemmän kuin 1:3 ja rikastushiekka-altaan kuivan, karkearakeisen osuuden pitäisi olla le-veämpi kuin padon korkeus. Jos ylävirtaan korotetussa altaassa varastoidaan vettä, täytyy välttää altaan ylitäyttöä ja ylläpitää riittävä kuivavara, varautua poik-keusolosuhteiden aiheuttamiin vesimääriin, pidettävä padon juuri kyllästymättö-mänä vettymisen välttämiseksi ja valvoa suotoveden kulkua padossa. (European Commission 2009, 393.)

2.2.2 Alavirtaan korotus

Kuvassa 9 esitetty kaivannaisjätealtaan alavirtaan korotus kasvattaa altaan läji-tystilavuutta ja padon alusrakenteet huomioden altaasta ulospäin viety korotus on stabiili. Kustannuksiltaan alavirtaan korotus on kallein korotustapa. Padon

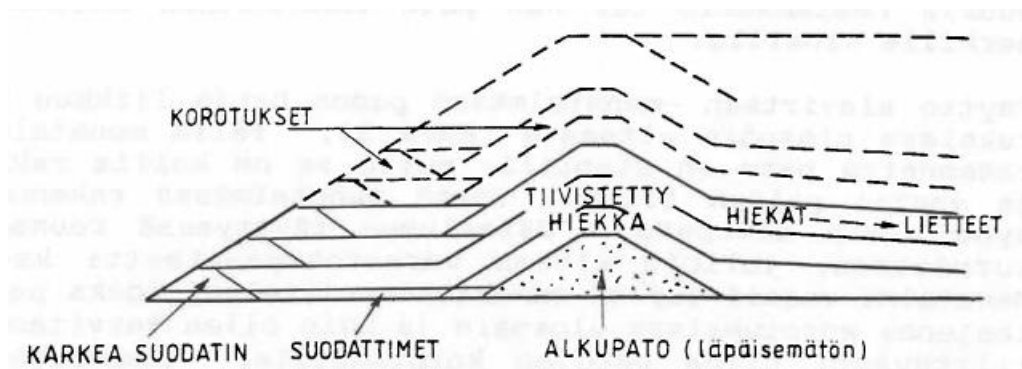
harjan siirtyessä ulospäin altaasta tilan ja korotusmateriaalin tarve on suuri. Alavirtaan korotusta käytetään yleisesti altaissa, joihin läjitetään nestemäisiä kaivannaisjätteitä. (Saarela 1990, 13.)



KUVA 9. Kaivospadon korotus alavirtaan (Saarela 1990, 14)

2.2.3 Korotus padon keskilinjan molemmin puolin

Padon keskilinjan molemmin puolin korotuksen periaate on esitetty kuvassa 10. Tässä korotustavassa yhdistyy ylävirtaan ja alavirtaan korotuksen hyvät puolet. Korotus keskilinjan molemmin puolin vie vähemmän tilaa ja korotusmateriaalia kuin alavirtaan korotus ja se on myös stabiliteetiltään parempi kuin ylävirtaan korotus. Se onkin yleensä kompromissi ylävirtaan ja alavirtaan korotuksien väliltä. Korottaessa keskilinjan molemmin puolin padon harja pysyy samalla kohdalla jokaisessa korotusvaiheessa. (Saarela 1990, 14.)



KUVA 10. Korotus padon keskilinjan molemmin puolin (Saarela 1990, 14)

2.2.4 Tavanomainen, lopulliseen korkeuteen rakennettu pato

Tavanomaisen lopulliseen korkeuteen rakennetun padon etuina ovat laadunvalvonnan helppous verrattuna korotettaviin rakennusmenetelmiin. Haittapuolena

ovat usein liian korkeat kustannukset verrattuna esimerkiksi ylävirtaan korotusmenetelmään. Yleensä padot rakennetaan lopulliseen korkeuteen, kun rikastushiekka ei sovellu padon rakennusmateriaaliksi, tai silloin, kun allasta käytetään vedenvarastointiin. (European Commission 2009, 391-392.)

Tavanomaisen padon rakennus voi olla myös järkevää, jos rikastushiekan käsittelyalue on syrjäisessä, vaikeasti saavutettavassa paikassa ja prosessivesiä joudutaan säilyttämään pitkiä aikoja myrkyllisten ainemäärien vähentämiseksi. Pato voidaan mahdollisesti rakentaa lopulliseen korkeuteen myös, kun luonnollinen tulovirtaama altaaseen on suuri tai silloin, kun allas on altis suurille tulovirtaaman vaihteluille, jolloin vesien hallintaan vaaditaan varastointikapasiteettia. (European Commission 2009, 391-392.)

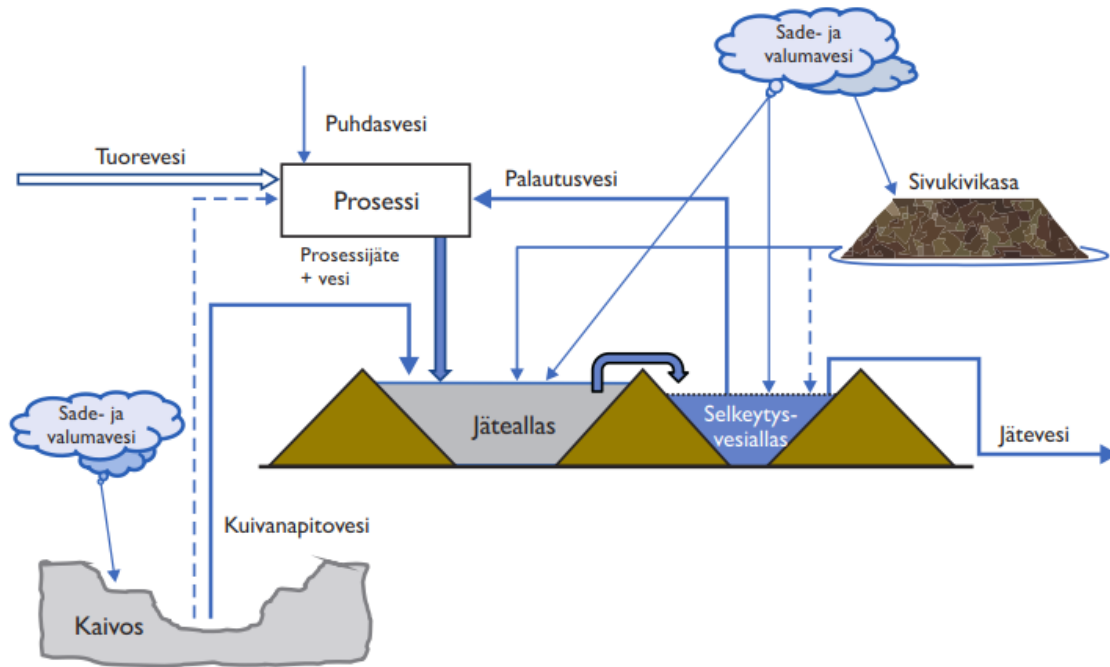
2.3 Läjitysnopeus

Kaivannaisjätealtaiden korotus täytyy tehdä vaiheittain osittain myös siitä syystä, että läjitetty aines ehtisi konsolidoitumaan, mikä on tärkeää etenkin ylävirtaan korottaessa. Läjitetyn aineksen konsolidoituessa huokosvedenpaine pienenee parantaen rakenteen stabiiliteettia. Toimiva kuivatusjärjestelmä edesauttaa huokosveden purkautumista. Läjitysnopeuden rajoitukset eri korotusmenetelmissä on esitetty aiemmin taulukossa 4. (Zardari 2011, 34-35.)

2.4 Vedenjohtaminen

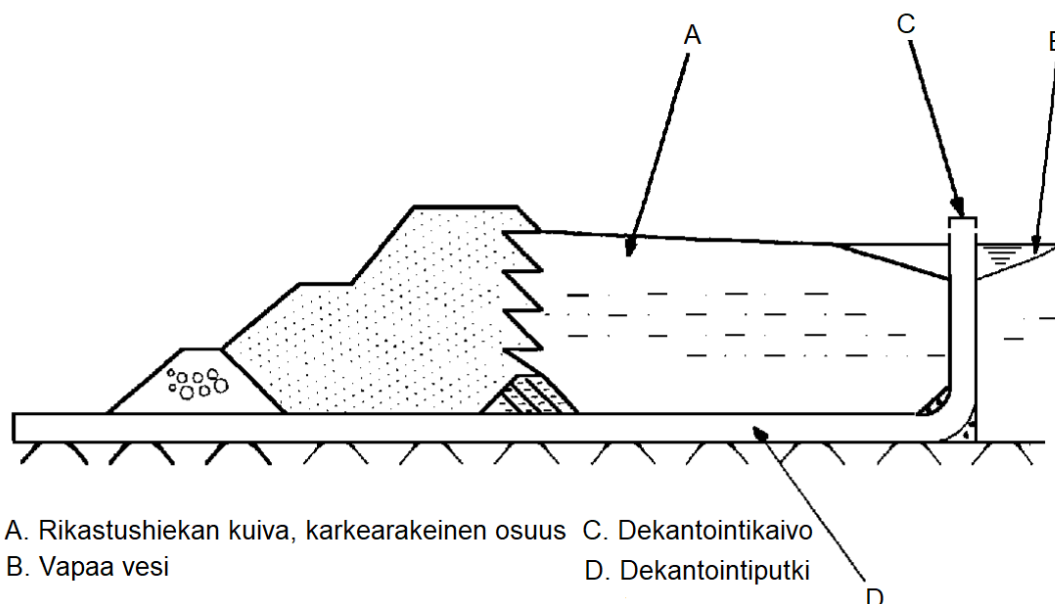
Koko altaan käyttöiän ajan yhtenä riskienhallinnan keinona on pitää altaan vapaan veden alue mahdollisimman pienenä ja matalana. Rikastushiekan laskeutumiselle tarvittava aika täytyy kuitenkin huomioida. Veden kyllästävä rikastushiekka ei myöskään pölyä. (European Commission 2009, 81.)

Selkeytysaltan käyttö on hyvä keino pitää vapaan veden määrä mahdollisimman pienenä. Selkeytysallas mahdollistaa myös hienoainespitoisen lietteen laskeutuksen. Kuvassa 11 on esitetty kaaviokuva kaivoksen perinteisestä vesikierrosta. Tuorevedellä tarkoitetaan lähivesistöstä otettua pintavettä ja puhdasvedellä tarkoitetaan talousvettä. (European Commission 2009, 81; Kauppila ym. 2011, 35.)



KUVA 11. Kaaviokuva kaivoksen perinteisestä vesikierrosta (Kauppila ym. 2011, 35)

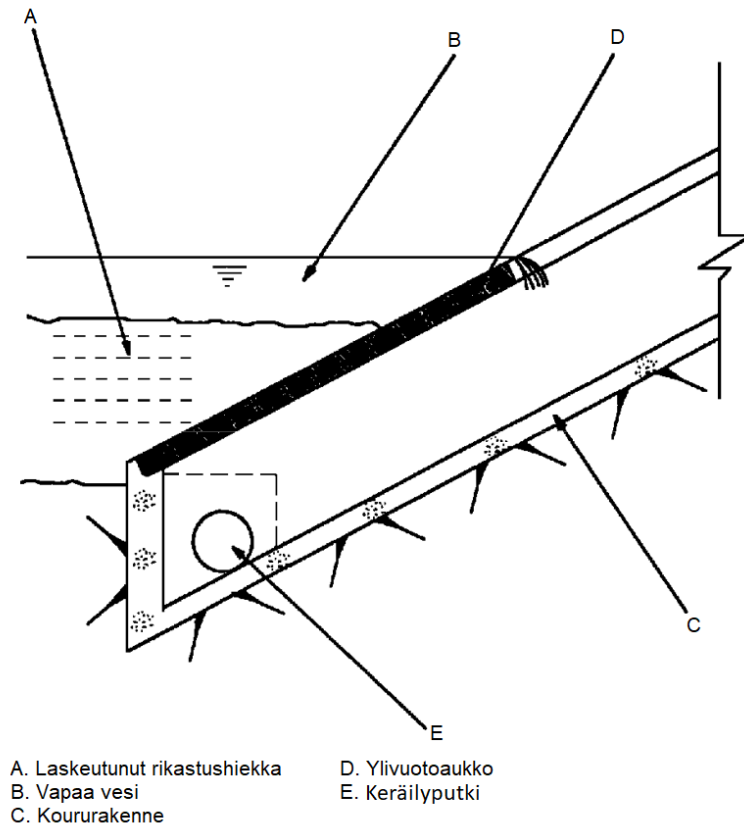
Veden poisjohtaminen vaatii toimivan poistojärjestelmän, jota voidaan säätää vaiheittain korotettavan altaan mukana. Poistettu vesi joko palautetaan rikastusprosessiin tai puretaan vesistöihin käsittelyn jälkeen. Poistojärjestelmä eli dekantointijärjestelmä koostuu yleensä säädettävästä vedenotto-osasta eli dekantointikaihosta ja dekantointiputkesta, jolla poistettavat vedet johdetaan pois altaasta. Vedenpoisto tapahtuu yleensä pystysuoralla kaivolla, josta esimerkki on kuvassa 12. (European Commission 2009, 81.)



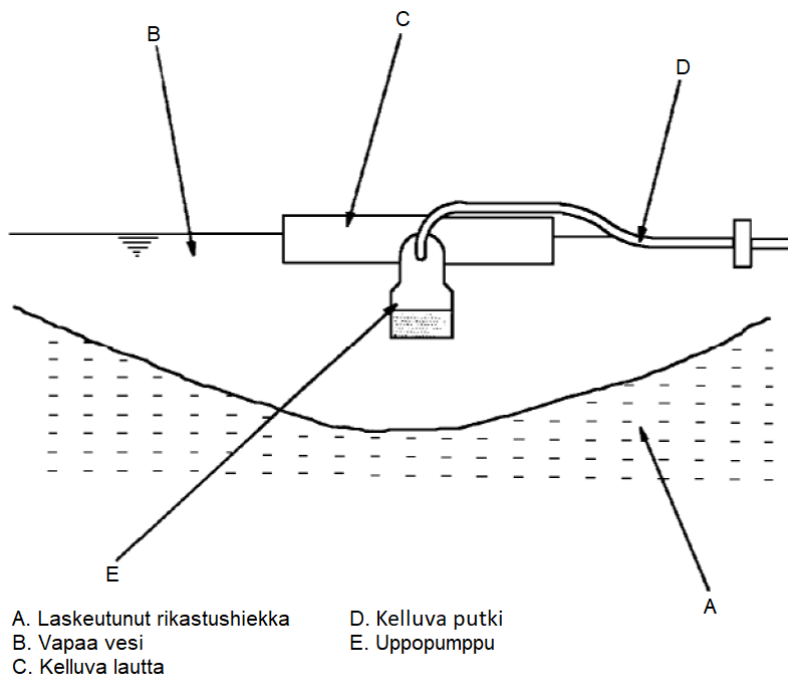
KUVA 12. Dekantointijärjestelmä pystysuoralla kaivolla (muokattu European Commission 2009, 82)

Dekantointikaivot ovat osoittautuneet toimiviksi kylmissä tasapainoisen vesitaseen omaavissa olosuhteissa. Dekantointikaivojen suunnittelussa täytyy kuitenkin ottaa huomioon rikastushiekan aiheuttama paine koko altaan käyttöiän ajan. Vedenpoiston tapahtuessa painovoimaisesti pumpuille ja niiden tarvitsemalle taseiselle energiansaannille ei ole tarvetta. Dekantointikaivojärjestelmän huonona puolena on se, että ne lävistävät padon, jolloin patorakenne mahdollisesti heikenee. (European Commission 2009, 394.)

Veden poisjohtamiseen voidaan myös käyttää kaltevaa kourua (kuva 13), joka sijaitsee yleensä altaan reunalla. Joskus se voi olla myös märkäluiskaa vasten. Dekantointikaivon ja kaltevan kourun lisäksi veden poisjohtamiseen on mahdollista käyttää altaaseen asetettua kelluvaa pumpputta (kuva 14), jolla uppo-pumpun avulla vesi pumpataan kelluvaa putkea pitkin altaan ulkopuolelle. (European Commission 2009, 81.)



KUVA 13. Dekantointijärjestelmä kaltevalla koururakenteella (muokattu European Commission 2009, 82)



KUVA 14. Pumppulautta (muokattu European Commission 2009, 83)

Veden poisjohtaminen voidaan myös hoitaa salaojitetulla altaalla tai ylivuotora-kenteilla padossa tai padon ympärillä. Lisäksi patoihin asennetaan aina ylivuoto-järjestelmä poikkeustilanteita, kuten äärimmäisiä sade- ja sulamisvesimääriä var-ten. Sen tarkoituksena on estää patoa murtumasta, kun varsinainen veden pois-johtamiseen tarkoitettu järjestelmä pettää tai kun sen kapasiteetti ei riitä veden poisjohtamiseen. (European Commission 2009, 83, 395.)

Yleisimmin käytetyssä ylivuotojärjestelmässä useat suurikokoiset putket lävistä-vät padon sellaiselta korkeudelta, jolta etukäteen suunniteltu vähimmäiskuiva-vara on mahdollista ylläpitää. Käytettäessä tämän tapaista ylivuotojärjestelmää vältetään patorakenteille aiheutetulta eroosioriskiltä. (European Commission 2009, 83, 395.)

Vaihtoehtoisesti ylivuotojärjestelmä voidaan toteuttaa hallitusti säännösteltävällä ylijuuksutuksella padon yli tai maaperään tehdyillä rakenteilla, mikä on mahdol-lista vain laaksoon rakennetulla altaalla. Käytettäessä näitä ylivuotojärjestelmiä täytyy eroosiosuojaukseen kiinnittää erityistä huomiota. (European Commission 2009, 396.)

2.5 Kalvotettujen altaiden kuivatusrakenteet

Kalvotettujen kaivannaisjätealtaiden kuivatus hoidetaan yleensä altaan alaosa-sta käsin. Kuivatusrakenteiden avulla altaaseen läjitetystä kaivannaisjätteestä pois-tetaan prosessivesiä ja täten nopeutetaan läjitetyn jätteen konsolidoitumista. Kui-vatusrakenteena voidaan käyttää koko altaan alan kattavaa kuivatuskerrosta (luku 2.1.4), joka sijaitsee altaan pohjassa, tai altaaseen asennettua kuivatusput-kijärjestelmää. Usein kuivatusjärjestelmässä näiden lisäksi käytetään erilaisia geosynteettisiä tuotteita, kuten geotekstiileitä ja salaojamattoja. (Touze-Foltz ym. 2009, 13-14.)

Toimiva kuivatusjärjestelmä on olennainen osa kaivannaisjätteen käsittelyjärjes-telmää. Se mahdollistaa huokosveden purkautumisen vähentäen painumisaikaa. Samalla se lisää läjitetyn kaivannaisjätteen tiheyttä, jolloin altaan läjityskapasi-teetti kasvaa. Kuivatusjärjestelmä parantaa myös prosessiliuosten palauttamista

takaisin rikastusprosessiin ja alentaa allasrakenteisiin kohdistuvaa hydraulista gradienttia. (Touze-Foltz ym. 2009, 14.)

Kuivatusjärjestelmien rakenteet vaihtelevat merkittävästi riippuen toivotusta tarkoituksesta ja järjestelmän toiminnasta sekä läjitettävästä kaivannaisjätteestä. Esimerkiksi koko altaan kattavaa kuivatusputkijärjestelmää voidaan käyttää, jos läjitysaltaan kapasiteetti on yksi tärkeimmistä ominaisuuksista toiminnan kannalta. Joskus toiminnan takaamiseksi riittää, että kuivatusputket asennetaan vain tiettyyn osaan allasta. (Touze-Foltz ym. 2009, 14.)

Tavallisesti kuivatusputket asennetaan altaan pohjalle ja ne ympäröidään tarkoituksenmukaisella vettä johtavalla materiaalilla, kuten salaojituksessa on yleisesti tapana. Geotekstiilin eli suodatinkankaan käyttö putken yläpuolella tai ympärillä vähentää putkistoon kulkeutuvaa hienoaineksen määrää. Kuivatusputket yhdistyvät kuivatusjärjestelmän runkoputkiin, jotka johtavat järjestelmään kertyneet vedet altaan ulkopuoliseen keräilyjoaan- tai putkistoon. (Touze-Foltz ym. 2009, 14.)

Kaivannaisjätealtaan kuivatusjärjestelmän keskeisiin suunnittelun lähtökohtiin kuuluu kuivatusputkien sijainnin määrittäminen ja putkien koon mitoittaminen ennakoiduille virtausmäärille. Lisäksi suunnittelussa tulee selvittää yhteensopiva suodatinmateriaali, jotta vältytään putkiston tukkeutumiselta, ja putkiin kohdistuva ulkoinen kuormitus. (Touze-Foltz ym. 2009, 14.)

2.6 Patoturvallisuus

Patoturvallisuuslakia sovelletaan patoihin ja kaikkiin niihin kuuluviin rakenteisiin ja laitteisiin rakennusmateriaalista, -tavasta tai padotettavasta aineesta riippumatta (L 26.6.2009/494). Kaivosalueilla sijaitsevat maanpäälliset kaivospadot kuuluvat patoturvallisuuslain piiriin. Kaivospatoihin sovelletaan vesistö- ja jätepaduille asetettuja vaatimuksia ja suosituksia sekä myös kaivoslain turvallisuutta koskevia säännöksiä. Käytännössä kaivospatoihin sovelletaan vuonna 2012 laadittua patoturvallisuusopasta. (Isomäki ym. 2012, 5; Sivonen – Frilander 2001, 11.)

Padot luokitellaan vahingonvaaran perusteella luokkiin 1, 2 ja 3 (L 26.6.2009/494). Padot, jotka onnettomuuden sattuessa aiheuttavat vaaraa

ihmishengelle ja terveydelle tai huomattavan vaaran ympäristölle tai omaisuudelle, luokitellaan 1-luokkaan. 2-luokkaan kuuluvat padot, jotka onnettomuuden sattuessa saattavat olla vaaraksi terveydelle tai aiheuttavat vähäistä suurempaa vaaraa omaisuudelle tai ympäristölle. 3-luokan padot eivät aiheuta vaaraa ihmishengelle tai terveydelle, eivätkä myöskään pienimuotoista suurempaa vaaraa omaisuudelle tai ympäristölle. Jäte- ja kaivospadot voidaan jättää luokittelematta, jos ne eivät aiheuta sortumatilanteessa vaaraa ympäristölle tai terveydelle. Kaikesta huolimatta patoja on aina kuitenkin tarkkailtava. (Isomäki ym. 2012, 18-19.)

Kaivannaisjätealtaiden padot luokitellaan yleensä 2-luokkaan. Tällöin pato aiheuttaa pato-onnettomuustilanteessa esimerkiksi tärkeiden virkistys- tai kalastusalueiden vesistöjen laadun pitkäaikaisen heikkenemisen, suurien viljelysalueiden pilaantumisen ja pitkäaikaisen toiminnan rajoittamisen tai useiden talousvesikajojen veden pilaantumisen. (Isomäki ym. 2012, 19.)

1-luokkaan luokitellut kaivospadot voivat aiheuttaa tulva-aallon lisäksi padotetun jäteaineksen ominaisuuksista johtuvan vaaran ihmishengelle ja terveydelle. Jos jäte- tai kaivospato aiheuttaa merkittävien luontoarvojen menetyksen, harvinaisten lajien tuhoutumisen tai tärkeän vedenhankintaan käytettävän tai soveltuvan pohjavesialueen tai vesistön pilaantumisen, kuuluu pato 1-luokkaan. Pääsääntöisesti 1-luokkaan kuuluvat myös ympäristösuojelulain ja kaivannaisjäteasetuksen mukaiset suuronnettomuuden vaaraan aiheuttavat kaivannaisjätealtaiden padot. (Isomäki ym. 2012, 18-19.)

3-luokkaan kuuluessa jäte- tai kaivospato saa aiheuttaa padotun jäteaineen laadun tai määrän vuoksi korkeintaan lyhytaikaisen vaikutuksen purkuvesistöön eikä se saa aiheuttaa pohjavesiesiintymien pilaumisvaaraa. Jäte- ja kaivospadoista 3-luokkaan kuuluvat yleisesti suotovesien keräykseen käytettävät padot ja erilaiset tasaus- tai varoaltaiden padot, joissa padotettavaa ainesta on vain poikkeustilanteissa. (Isomäki ym. 2012, 19.)

3 KAIVANNAISJÄTTEEN OMINAISUUKSIA

Rikastushiekkojen ominaisuudet voivat vaihdella riippuen kiviaineksen alkupe-
rystä, rikastusprosessista ja läjitystavasta. Kiviaineksen alkuperä vaikuttaa rakei-
suuteen, sisäiseen kitkakulmaan ja tilavuuspainoon, kun taas läjitystapa vaikut-
taa irtotiheyteen, huokoslukuun, huokoisuuteen ja vedenläpäisevyyteen. Rikas-
tusprosessissa käytetyt aineet, kuten flokkulantit ja syanidi voivat myös vaikuttaa
rikastushiekan geoteknisiin ominaisuuksiin. Rikastushiekkojen geoteknisiä omi-
naisuuksia voidaan osittain verrata luonnonmaalajeihin. Rikastushiekkoihin liite-
tyt ominaisuudet ovat yleensä korkea vesipitoisuus ja huokoisuus, alhaisesta
keskinkertaiseen oleva vedenläpäisevyys ja pienet plastisuusominaisuudet.
(Jantzer – Knutsson 2007, 6; Klohn Crippen Berger 2017, 6.)

Rikastushiekat voidaan yleensä luokitella indeksi- ja geoteknisten ominaisuuk-
sien, kuten rakeisuuden, ominaispainon ja Atterbergin rajojen eli konsistenssiraj-
ojen mukaan. International Commission on Large Dams ICOLD (2017) on jaka-
nut erityyppiset rikastushiekat 5:een eri luokkaan, jotka ovat esitetty taulukossa
5. Luokittelu perustuu rikastushiekan rakeisuuteen ja kiviaineksen laatuun.
(Klohn Crippen Berger 2017, 8.)

TAULUKKO 5. Rikastushiekkojen luokittelu ICOLDin (2017) mukaan (Klohn Crippen Berger 2017, 8)

Rikastushiekan tyyppi	Tunnus	Kuvaus	Esimerkkejä ²
Karkea (coarse tailings)	CT	Siltistä hiekkaa, ei-plastinen	Suola, mineraalihiekka, karkeat kivihiilen pesurejektit, rautamalmien karkea rikastusjäte
Kova kiviaines (hard rock tailings)	HRT	Hiekkaista silttiä, ei-plastinen...alhainen plastisuus	Kupari, massiivinen sulfidimalmi, nikkeli, kulta
Muuttunut kiviaines (altered rock tailings)	ART	Hiekkaista silttiä, joitain määriä savirakeita, alhainen plastisuus	Porfyirikupari hydrotermisellä muuttumisella, hapettunut kiviaines
Hieno (fine tailings)	FT	Silttiä, joitain määriä savea, alhainen...keskinkertainen plastisuus	Hienot kivihiilen pesurejektit, bauksiittijäte (punalieju)
Äärimmäisen hieno (ultra fine tailings)	UFT	Siltistä savea, korkea plastisuus, hyvin pieni tilavuuspaino ja vedenjohtavuus	Öljyhiekan rikastusjäte (laskeutunut, keskikerroksen lieju MFT) ¹ , fosfaatin rikastuksessa syntynyt hienoaaines, jotkut kimberliitin ja kivihiilen rikastuksessa syntyneet hienoainekset

¹Öljyhiekan rikastusjäte on peräisin bitumin erotusprosessista, jossa bitumi erotetaan hiekasta kuumalla tai lämpimällä vedellä. Tämän jälkeen liete pumpataan ja läjitetään maanpäällisiin jätealtaisiin. Rikastusjätteen hienorakeinen osuus (MFT, mature fine tailings) kerääntyy altaan keskiosaan. Usean vuoden jälkeen MFT:n, joka on n. 86% vettä, kuiva-ainepitoisuus saattaa olla ainoastaan 30 %:sta 35 %:a.

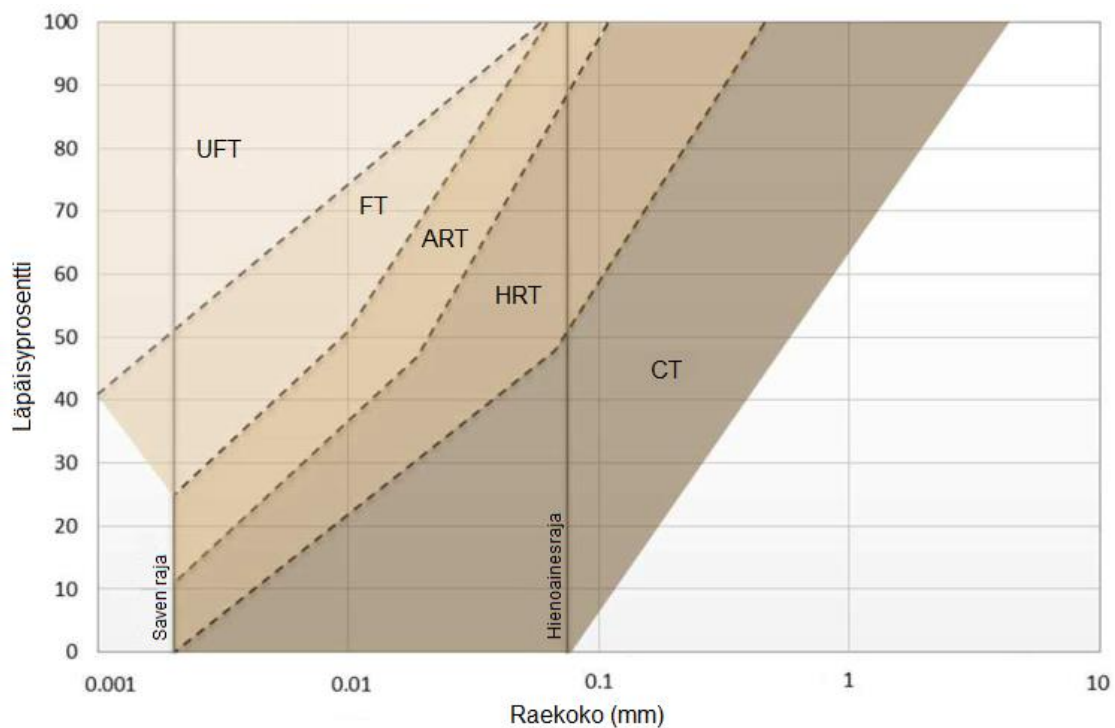
²Esimerkit eivät ole kaikenkattavia. Joistain malmilajeista muodostuu useita erilaisia rikastusjätteitä, jotka sopivat useaan eri luokkaan, esimerkiksi porfyirikupariesiintymistä voi muodostua karkeaa tai hydrotermisesti muuttunutta kiviainesjätettä.

3.1 Rakeisuus

Rakeisuus tarkoittaa eri suuruisten rakeiden suhteellista painojakaumaa. Rakeisuuden määrittämiseen käytetään karkearakeisilla maalajeilla kuivaseulontaa. Paljon hienoaainesta sisältäville maalajeille rakeisuuden määrittämiseen käytetään pesuseulontaa ja täysin hienorakeisten maalajien rakeisuus määritetään yleensä areometrikokeella. Rakeisuuden määrittäminen tehdään standardin SFS-EN ISO 17892-4:2016:en mukaan. (Rantamäki – Jääskeläinen – Tammirinne 2006, 72-76; RIL 157-1-1985, 99.)

Rakeisuuskäyrän perusteella saadaan erilaisia tunnuslukuja, joita käytetään maalajin ominaisuuksien arvioimiseen. Näitä ovat muun muassa keskiraekoko d_{50} , joka kuvaa raekokoa läpäisyprosentin 50 kohdalla, ja raekokosuhde C_u eli d_{60}/d_{10} , jota käytetään maalajin lajittuneisuuden mittana. (Rantamäki – Jääskeläinen – Tammirinne 2006, 72-76; RIL 157-1-1985, 99.)

Rikastushiekat ovat murskatusta kiviaineksesta koostuvia pieniä rakeita ja hiukasia, tavallisesti 0,01 mm:stä 0,1 mm:iin raekooltaan. Luonnollisten maalajien mukaan luokiteltuna rikastushiekat ovat siis hiekkaa tai silttistä hiekkaa (siHk), tosin rikastushiekka voi myös olla hyvin hienoainespitoista, jolloin se voidaan luokitella siltiksi tai jopa saveksi. Kuvassa 15 on taulukossa 5 mainittu ICOLDin (2017) laatima rikastushiekkojen luokitus raekokojakauman perusteella esitettyä. (Bhanbhro 2017, 32; Jantzer – Knutsson 2007, 6; Klohn Crippen Berger 2017, 8.)

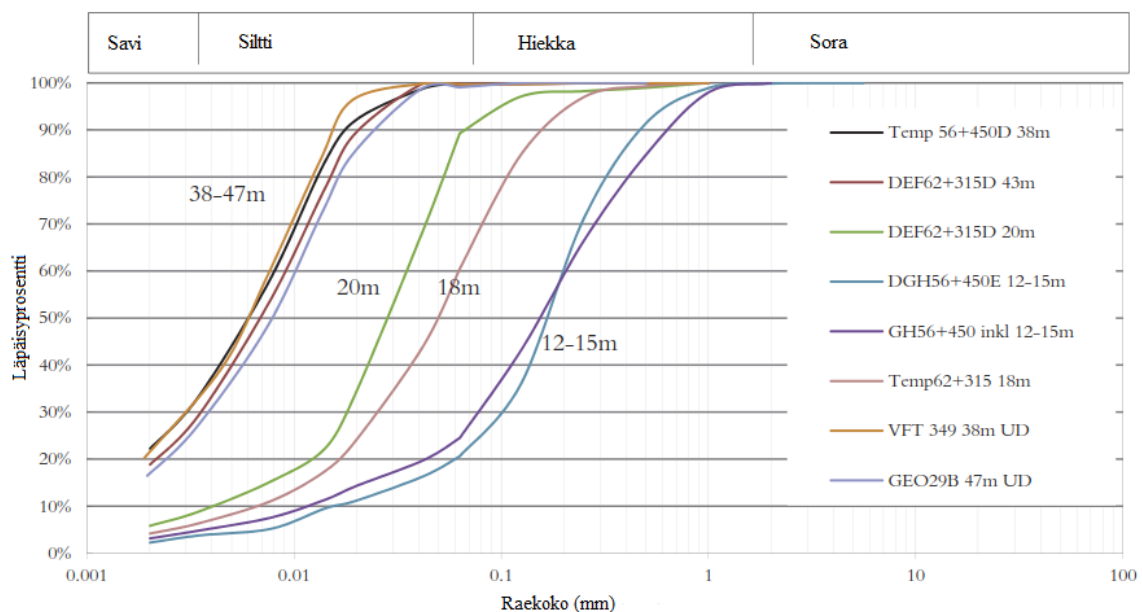


KUVA 15. Rikastushiekkojen luokittelu raekokojakauman perusteella ICOLDin (2017) mukaan (muokattu Klohn Crippen Berger 2017, 9)

Bhanbhron (2017) tekemässä, Ruotsissa sijaitsevan Aitikin kaivoksen rikastushiekan tutkimuksessa näytteiden keskiraekoko d_{50} vaihteli 0,006 ja 0,160 mm:n

välillä ja niiden keskiraekoko pieneni syvemmälle mentäessä. Raekokosuhte C_u vaihteli 20 m:n syvyydestä ylöspäin otetuissa näytteissä 8,8:n ja 17,5:n välillä. Näytteet oli otettu häiriintymättömänä ja häiritynä eri syvyyksistä CPTU-kairaus-ten perusteella määritetyistä rikastushiekkapadon heikoista kohdista. Kuvassa 16 on esitetty rikastushiekkänäytteiden rakeisuuskäyrät eri syvyyksissä. (Bhanbhro 2017, 32-33.)

Geoteknisen maalajiluokituksen (Korhonen – Gardemaister – Tammirinne 1974, 11-14) mukaan 12-15 m:n syvyydestä otetut näytteet vastaavat sekarakeista tai suhteistunutta hiekkaa (Hk). 18 m:n syvyydeltä otettu näyte vastaa sekarakeista hiekaista silttiä (hkSi). 20 m:n syvyydeltä otettu näyte vastaa silttiä (Si) ja se on myös sekarakeista. 38-47 m:n syvyydeltä otetut näytteet vastaavat kutakuinkin savista silttiä (saSi). (Bhanbhro 2017, 32-33.)

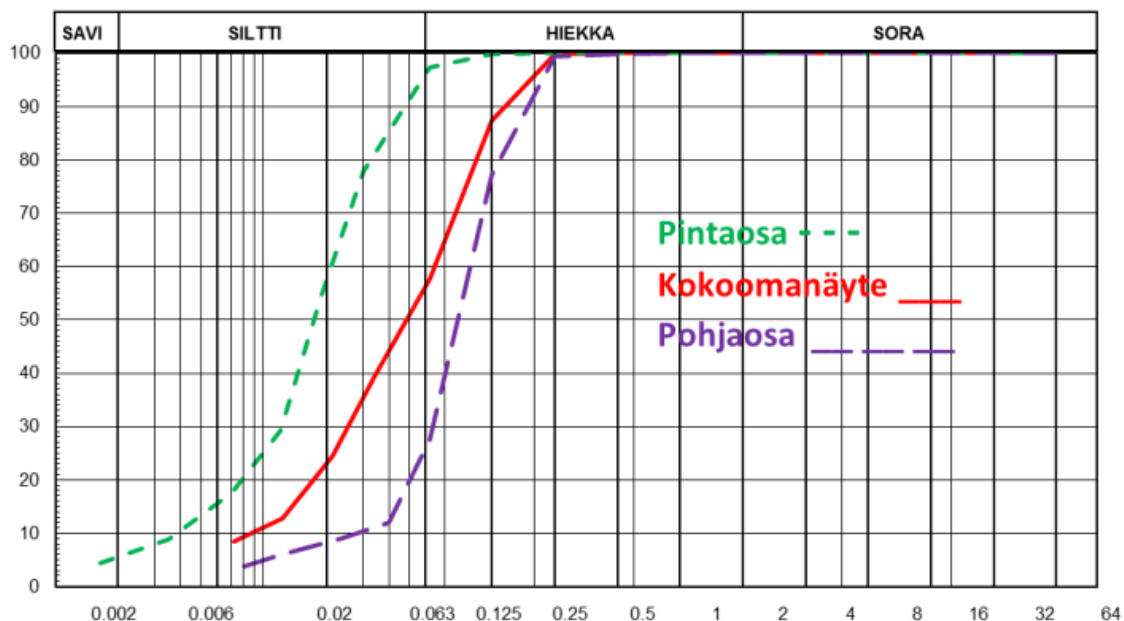


KUVA 16. Eri syvyyksistä otettujen näytteiden rakeisuuskäyrät (muokattu Bhanbhro 2017, 32)

Sotkamon hopeakaivoksen pilot-ajojen rikastushiekalle Laitisen (2014) tekemässä tutkimuksessa keskiraekoko d_{50} oli näytteen pintaosalla 0,018 mm, pohjaosalla 0,085 mm ja kokoomanäytteellä 0,050 mm. Raekokosuhte C_u oli pintaosassa 5,0, pohjaosassa 10,0 ja kokoomanäytteessä 6,5. (Laitinen 2014, 45.)

Näyte oli toimitettu tutkittavaksi muovitynnyrissä ilmatiiviisti suljettuna. Näyte jaettiin kolmeen osaan, koska epäiltiin, että näyte olisi mahdollisesti lajittunut kuljetuksessa. Päälimmäinen purettu osuus edusti rikastushiekan pintaosaa, toinen purettu osuus edusti rikastushiekan keskiosaa ja viimeinen purettu osuus edusti rikastushiekan pohjaosaa. Näytteen lajittumisesta aiheutuvaa koetulosten vääristymää vähennettiin kokoomanäytteellä. Kokoomanäyte sisälsi massamääräisesti saman osuuden näytteen pinta-, keski- ja pohjaosasta. Tutkitun näytteen eri osien rakeisuuskäyrät ovat kuvassa 17. (Laitinen 2014, 20.)

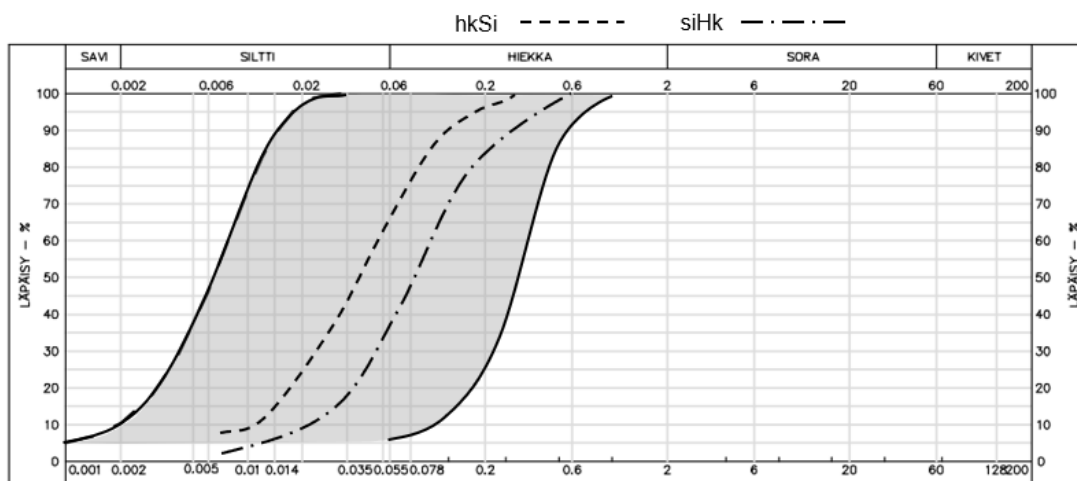
Geoteknisen maalajiluokituksen (Korhonen ym. 1974, 11-14) mukaan näytteen pintaosa vastaa tasarakeista silttiä (Si), pohjaosa vastaa sekarakeista siltistä hiekkaa (siHk) ja kokoomanäyte vastaa sekarakeista hiekkaista silttiä (hkSi). (Laitinen 2014, 45.)



KUVA 17. Rikastushiekanäytteen pintaosan, kokoomanäytteen ja pohjaosan rakeisuuskäyrät (Laitinen 2014, 46)

Terrafame Oy:n kaivoksen kipsisakalle ennen vuotta 2018 tehtyjen tutkimusten perusteella kipsisakka vastasi keskisilttiä ja keskiraekooksi d_{50} määritettiin 0,02-0,03 mm. Näytteet otettiin tuotantolinjalta, minkä jälkeen ne kuljetettiin Oulun yliopistolle tutkittavaksi. (Kipsisakka-altaan 1 sulkemisen yleissuunnitelma. 2018.)

Kuvassa 18 on esitetty Suomessa tutkittujen kaivannaisjätteiden yleisluonteinen raekokojakauma. Suomessa tutkitut kaivannaisjätteet voivat vaihdella maalajiluokituksen perusteella siltin ja hiekan välillä. Yleisesti Suomen kaivannaisjätteet vastaavat hiekkaista silttiä (hkSi) tai silttistä hiekkaa (siHk). Laitisen (2014) tutkimia pilot-ajojen näyte on siis hyvin tavanomainen rakeisuudeltaan, sitä vastoin Terrafamen kipsisakka on laadultaan hyvin hienojakoista. (Lehmikangas 2018.)

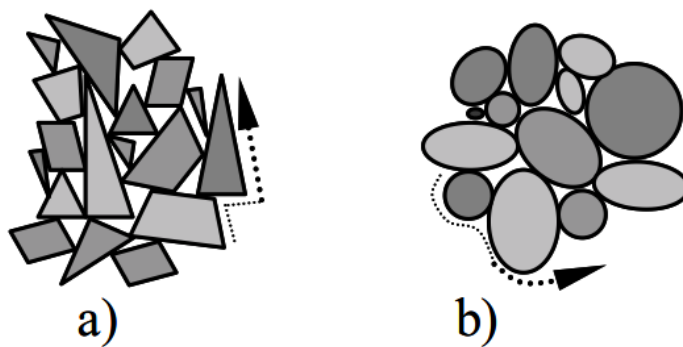


KUVA 18. Suomessa tutkittujen kaivannaisjätteiden yleisluontoinen raekokojakauma

3.2 Raemuoto

Kiviaineksen murskauksen ja jauhamisen seurauksena muodostuu paljon teräväsärmäisempää rietta verrattuna luonnonmaalajeihin. Raemuotojen ero on esitetty kuvassa 19. Rikastushiekan teräväsärmäisyys tuo mukanaan jonkin verran vaikeuksia materiaaliparametrien määrittämiseen. Huokoisuus, leikkauslujuus ja vedenläpäisevyys ovat yleisesti tarkoin määritettyjä ominaisuuksia luonnonmaalajeille, kun taas edustavien laboratoriokokeiden aikaansaaminen rikastushiekalta voi olla haasteellista. (Jantzer – Knutsson 2007, 6.)

Teräväsärmäisyys voi olla osittain syynä vaihteleville leikkauslujuuskoetuloksille, koska jännityksen keskitys rikastushiekan reunoille voi johtaa rakeiden hienonemiseen ja suurempaan leikkauslujuuteen. Rikastushiekojen kitkakulma on suhteellisen korkea, jopa 45°. Rikastushiekan raemuoto saattaa myös vaikuttaa suotoveden virtaukseen. (Jantzer – Knutsson 2007, 6.)



KUVA 19. a) rikastushiekan ja b) luonnonmateriaalin raemuodon ero (Jantzer – Knutsson 2007, 7)

3.3 Vesipitoisuus

Vesipitoisuus tarkoittaa huokosveden ja kuivan aineksen massojen välistä suhdetta (RIL 157-1-1985, 103). Vesipitoisuus määritetään laboratoriokokein standardin SFS-EN ISO 17892-1:en mukaan. Kaivannaisjätealtaiden reunoilla on tyypillisesti pienempi vesipitoisuus kuin altaan keskiosassa. Ruotsissa Bjelkevik – Knutssonin (2005) tutkimien rikastushiekköjen vesipitoisuus vaihtelee 9 ja 39 %:n välillä, kun taas Bhanbhron (2017) tutkimien rikastushiekkänäytteiden vesipitoisuus vaihteli 15,2 ja 44,0 %:n välillä. Useimmat tutkitut rikastushiekkänäytteet olivat myös täysin veden kyllästämiä, mikä johtuu puutteellisesta kuivatuksesta. (Bhanbhro 2017, 31; Bjelkevik – Knutsson 2005, 122.)

Hu – Wu – Zhang – Zhang – Wenin (2016) tekemässä tutkimuksessa näytteiden vesipitoisuudet olivat 39-67 %. Niiden vesipitoisuus oli jokseenkin korkeampi kuin Bjelkevik – Knutssonin (2005) ja Bhanbhron (2017) tutkimien näytteiden vesipitoisuudet. Tutkitut näytteet olivat peräisin Yuhezhaan rautakaivokselta Kiinasta ja Bahuerachin kuparikaivokselta Meksikosta. (Hu ym. 2016, 1-2.)

Terrafame Oy:n kipsisakalle ennen vuotta 2018 tehdyissä laboratoriotutkimuksissa tuotantolinjalta otettujen näytteiden vesipitoisuudeksi määritettiin 131,1-133,4 %. Kipsisakan vesipitoisuus on siis huomattavasti suurempi kuin edellä mainittujen kaivannaisjätteiden vesipitoisuudet. (Kipsisakka-altaan 1 sulkemisen yleissuunnitelma. 2018.)

3.4 Painumaominaisuudet

Maata kuormitettaessa siinä tapahtuu aina jonkinlaatuisia muodonmuutoksia, jotka ilmenevät usein painumina. Painumat joudutaan ottamaan huomioon rakenteiden geoteknisessä suunnittelussa ja hienorakeisilla maalajeilla painumat ovat jopa määräviä mitoitusperusteita. Kokoonpuristumisominaisuudet voidaan jakaa kimmoiseen kokoonpuristumiseen, plastiseen kokoonpuristumiseen ja konsolidaation aiheuttamaan kokoonpuristumiseen. Käytännön kannalta näistä tärkein on konsolidaatiokokoonpuristuminen. (Rantamäki ym. 2006, 145.)

Konsolidaation aiheuttama kokoonpuristuminen tarkoittaa maan kokonaistilavuuden pienenemistä huokostilavuuden kutistumisen myötä. Kuormituksen alaisena maa-aineksen rakeet lähenevät toisiaan ja huokosvesi ja -ilma purkautuu. Konsolidaatiokokoonpuristuminen on pysyvä eikä se palaudu. Hienorakeisissa maissa painumista on ensisijaisesti tarkasteltava konsolidaatiokokoonpuristumisen perusteella. (Rantamäki ym. 2006, 146.)

Hienorakeisten maalajien painumaominaisuudet määritetään yleensä ödometrikokeen avulla standardin SFS-EN ISO 17892-5:2017:en mukaisesti. Ödometrikokeen tuloksien perusteella voidaan määrittää useita eri tunnuslukuja, kuten moduuliluku m , jännitysekspONENTTI β , kokoonpuristuvuuskerroin m_v ja konsolidaatikerroin c_v . Painumaa voidaan laskelmilla arvioida kokoonpuristuvuusmoduulin eli sekanttmoduulin, kokoonpuristuvuusindeksin tai Janbun tangenttimoduulimenetelmän avulla. (Rantamäki ym. 2006, 148-157; RIL 157-1-1985, 117-119.)

Konsolidoituminen ja kokoonpuristuvuus liittyvät rakeisuuteen eli karkearakeisen aineksen ja hienorakeisen lietteen väliseen suhteeseen, tilavuuspainoon ja huokoslukuun. Nämä kuvaavat kokonaistilavuuden muutosta, joka rikastushiekassa voi tapahtua ajan myötä johtuen kuivatuksesta tai kuormituksesta. Karkea- ja hienorakeiset rikastushiekat ovat kokoonpuristuvampia kuin muut samankaltaiset maalajit. (EPA, U.S. Environmental Protection Agency, 18.)

Vickin (1983) mukaan läjitetyn rikastushiekan kuivan karkearakeisen osuuden konsolidaatiokertoimen c_v suuruus voi vaihdella 0,5:stä 100:aan cm^2/s , näin ollen

sen primääripainuma tapahtuu hyvin nopeasti. Hienorakeisten lietteiden konsolidaatiokerroin voi taas vaihdella $1 \cdot 10^{-5}$ ja $1 \cdot 10^{-2}$ cm²/s:n välillä. Rikastushiekkojen sekundaaripainumaa, jossa rakeet uudelleenjärjestyvät huokospaineen purkauttua kokonaan ja virumisesta johtuvat muodonmuutokset päättyvät, pidetään epäolennaisena käytännön kannalta katsottuna. (Hamade 2013, 15.)

Laitisen (2014) tekemässä tutkimuksessa rikastushiekkänäytteen konsolidaatiokerroin c_v vaihteli $2,6 \cdot 10^{-3}$ ja $6,6 \cdot 10^{-3}$ cm²/s:n välillä eri kuormitusportaissa. Kokoonpuristuvuuskertoimen m_v suuruus vaihteli $7,7 \cdot 10^{-4}$ ja $1,2 \cdot 10^{-2}$ m²/kN:n välillä. Tutkitun rikastushiekkänäytteen moduuliluvuksi määritettiin 7,32 ja jännitysekspotentiksi $\beta -0,095$ eli näytteen kyllästyneen tilan painumaominaisuudet vastaavat saven vastaavia ominaisuuksia. (Laitinen 2014, 48-50.)

Terrafame Oy:n kaivoksella muodostuvalle kipsisakalle ennen vuotta 2018 tehdyissä laboratoriotutkimuksissa konsolidaatiokerroin c_v vaihteli eri kuormitusportaissa $1,3 \cdot 10^{-3}$ ja $3,2 \cdot 10^{-3}$ cm²/s:n välillä. Kokoonpuristuvuuserroin vaihteli kuormitusportaittain $6,0 \cdot 10^{-4}$ ja $1,3 \cdot 10^{-3}$ m²/kN:n välillä. Ödometrin perusteella moduuliluvuksi m määritettiin 10,26 ja jännitysekspotentiksi $\beta 0,25$. Vastaavasti Rowen ödometrillä moduuliluvuksi m saatiin 12,63 ja jännitysekspotentiksi $\beta 0,33$. Näiden tuloksien perusteella kipsisakka on voimakkaasti kokoonpuristuvaa. (Kipsisakka-altaan 1 sulkemisen yleissuunnitelma. 2018.)

3.5 Vedenläpäisevyys

Maalajit koostuvat rakeista ja niiden välisistä huokosista, joten kaikki maalajit ovat jokseenkin vettä läpäiseviä. Hiekassa ja sitä hienorakeisimmissa maissa veden virtaus on laminaarista. Näin ollen niissä veden virtaus noudattaa Darcyn lakia (kaava 1). Vedenläpäisevyyden määrittäminen tapahtuu yleensä vakiopainemenetelmällä tai muuttuvan paineen menetelmällä standardin CEN ISO/TS 17892-11:fi mukaisesti. Maaperän vedenläpäisevyyden määrittäminen voidaan myös tarvittaessa tehdä maastossa koepumppausmenetelmällä. (Rantamäki ym. 2006, 100-101; RIL 157-1-1985, 121.)

$$v = k \cdot i$$

KAAVA 1

missä v = veden virtausnopeus (m/s)
 k = vedenläpäisevyys (m/s)
 i = hydraulinen putous eli hydraulinen gradientti

Ruotsissa sijaitsevien kaivosten rikastushiekoille Bjelkevik – Knutssonin (2005) tekemien tutkimusten mukaan tutkittujen rikastushiekanäytteiden vedenläpäisevyys vaihteli $1,0\text{--}18,7 \cdot 10^{-6}$ m/s:n välillä, jolloin niitä voidaan verrata silttiin. Useammassa tapauksessa vedenläpäisevyys pienenee sen mukaan, mitä kauemmaksi mennään rikastushiekan purkukohdasta. Tämä johtuu hienorakeisen osuuden kulkeutumisesta altaan keskiosaan. Kuitenkin keskemmas allasta mentäessä huokosluku samalla kasvoi, joten tämän vaikutusta vedenläpäisevyyteen on vaikea arvioida. (Bjelkevik – Knutsson 2005, 127.)

Laitisen (2014) tutkiman näytteen vedenläpäisevyys vaihteli $1,01 \cdot 10^{-7}$ ja $6,82 \cdot 10^{-6}$ m/s:n välillä. Tulosten perusteella pääteltiin, että rikastushiekan vedenläpäisevyys voi vaihdella huomattavasti jopa samalla kaivoksella. Ennen vuotta 2018 tehtyjen Terrafamen kipsisakan laboratoriotutkimuksissa määritetty vedenläpäisevyys vaihteli $2,90 \cdot 10^{-7}$ ja $6,6 \cdot 10^{-9}$ m/s:n välillä. (Kipsisakka-altaan 1 sulkeamisen yleissuunnitelma. 2018; Laitinen 2014, 53.)

Bjelkevik – Knutssonin (2005, 127) mukaan rikastushiekkojen vedenläpäisevyyttä ei voida laskea riittävän tarkasti Hazenin kaavalla eikä myöskään Chapuisin kaavalla, joten laboratoriokeet ovat miltei välttämättömiä vedenläpäisevyyden määrittämiseen. Vedenläpäisevyyden määrittystä vielä vaikeuttaa rikastushiekkojen pysty- ja vaakasuuntaisten vedenläpäisevyysominaisuuksien vaihtelevuus, mikä johtuu kerroksellisesta läjitystavasta (EPA 1994, 18).

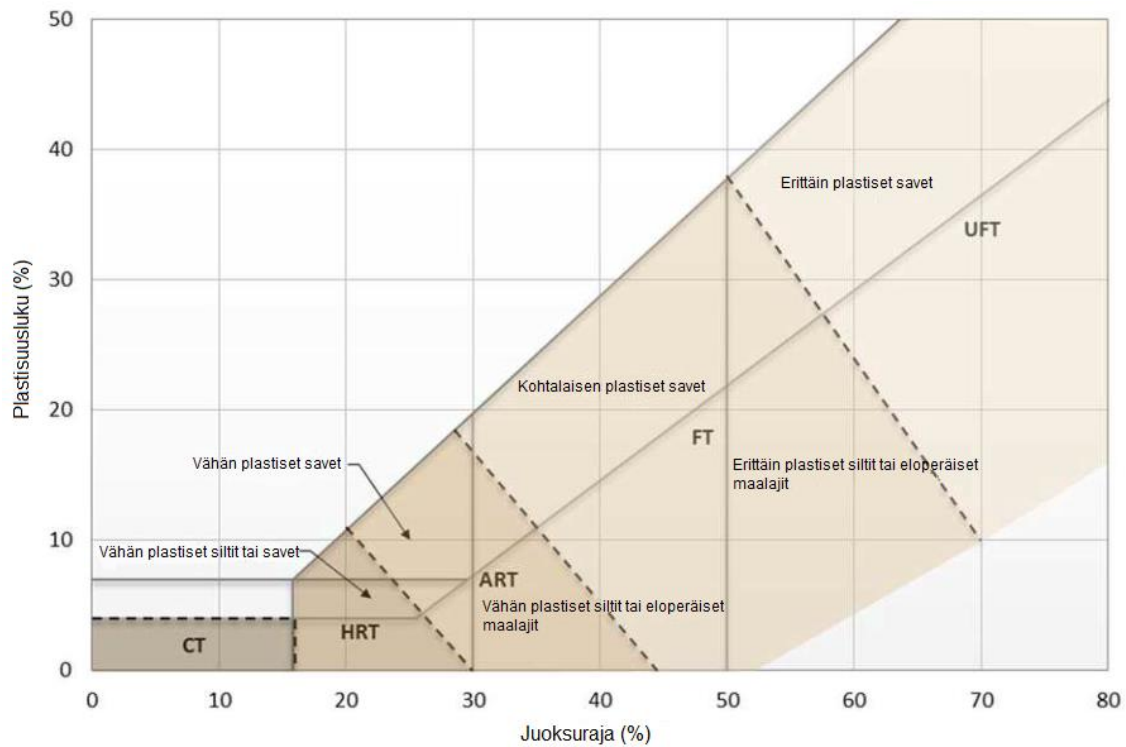
3.6 Plastisuusominaisuudet

Plastisuusominaisuudet voidaan määrittää vain hienorakeisille maalajeille. Hienorakeisilla maalajeilla on kolme konsistenssia eli olotilaa. Ne ovat kiinteä, plastinen ja juokseva. Näiden välisiä rajoja kutsutaan Atterbergin rajoiksi eli konsistenssirajoiksi. Atterbergin rajoja ovat kutistumisraja, plastisuusraja, juoksuraja ja takerrusraja. Näistä yleisimmin käytettyjä ovat plastisuusraja ja juoksuraja.

Atterbergin rajojen määrittäminen tehdään standardin CEN ISO/TS 17892-12:fi mukaan. (Rantamäki ym. 2006, 97-99; RIL 157-1-1985, 107.)

Plastisuusraja tarkoittaa puolikiinteän ja plastisen olomuodon välistä vesipitoisuusrajaa, missä maa-aines säilyttää muotonsa, kun sitä muokataan. Plastisen ja juoksevan olomuodon välinen vesipitoisuusraja on juoksuraja, tällöin maa-aines juoksee oman painonsa ansiosta. Kutistumisraja on kiinteän ja puolikiinteän olomuodon välinen vesipitoisuusraja. Kun vesipitoisuus on kutistumisrajan alapuolella, maan tilavuus ei muutu sen kuivatessa. Hienorakeiset maalajit ovat helposti murenevia niiden ollessa kiinteässä olomuodossa ja silloin, kun niiden vesipitoisuus on pieni. (RIL 157-1-1985, 107.)

Rikastushiekan plastisuus määräytyy hienoaineksen määrän ja laadun mukaan. Erittäin plastiset rikastushiekat ovat huonosti laskeutuvia ja konsolidoituvia sekä niiden kuivatus on hidasta ja vaikeaa pienen vedenläpäisevyyden vuoksi. Niiden myötölujuus voi olla myös suhteellisen suuri ottaen huomioon vesipitoisuuden. Pienen plastisuuden omaavat rikastushiekat ovat karkeampia ja niiden vedenläpäisevyys on suurempi, joten niiden kuivatus onnistuu paremmin. Kuvassa 20 on taulukon 5 mukainen ICOLDin (2017) laatima rikastushiekkojen luokitus Atterbergin rajojen mukaan ilmaistuna. (EPA 1994, 18; Kohn Crippen Berger 2017, 9.)



KUVA 20. Rikastushiekkojen luokittelu Atterbergin rajojen perusteella ICOLDin (2017) mukaan (muokattu Klohn Crippen Berger 2017, 10)

Hun ym. (2016, 2) tutkimien kahden eri kaivoksen rikastushiekkänäytteiden karkearakeisten osuuksien juoksuraja oli 28 %, plastisuusrajat olivat 19 % ja 13 % ja plastisuusluvuksi saatiin 9 % ja 15 %. Laitisen (2014, 47) tutkiman näytteen juoksurajaksi määritettiin 29,8 %, joten näiden kahden eri tutkimuksen näytteet olivat kutakuinkin samantapaisia plastisuusominaisuuksien puolesta.

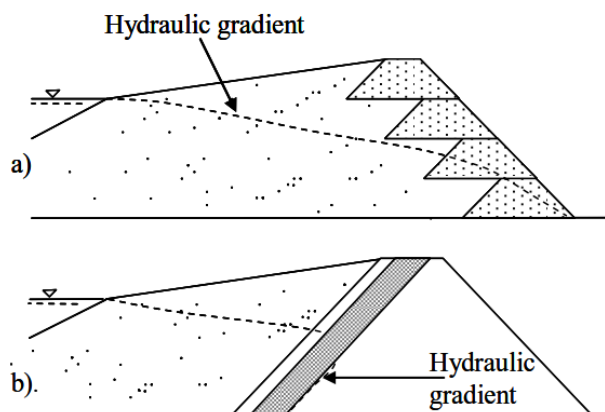
Terrafame Oy:n kaivoksella muodostuva kipsisakka on erittäin plastista. Tuotantolinjalta otettujen näytteiden juoksurajaksi määritettiin 80,7 ja 97,5 %. Kipsisakan vesipitoisuus (luku 3.3) on suurempi kuin juoksuraja, joten kipsisakka on tutkimusten perusteella yliherkkää ja se menettää lujuutensa miltei kokonaan häiriintyessään. (Kipsisakka-altaan 1 sulkemisen yleissuunnitelma. 2018.)

4 KALVOTETUN KAIVANNAISJÄTEALTAAN KOROTUKSEN HAASTEET

Kaivannaisjätealtaiden korkeus voi kasvaa nopeastikin nykyaikana tilan puutteen ja kaivostoiminnan tuotannon tehostumisen seurauksena. Tästä syystä yksi olennaisimmista ongelmista altaan stabiliteetin varmistamiseksi on pitää läjitysnopeus ja altaan täyttö sallituissa rajoissa. Tämä tulee erityisesti ottaa huomioon ylävirtaan korottaessa. (Priscu 1999, 1:8.)

Hydraulisella gradientilla on huomattava vaikutus patopenkerein stabiliteettiin. Hydraulinen gradientti aiheutuu vedenpinnan korkeuseroista ja vuototilanteesta se kasvattaa suotovirtausta. Suotovirtaus voi kasvattaa kaivannaisjätteen rakeisiin kohdistuvaa jännitystilaa pakottaen rakeet liikkeelle, minkä seurauksena syntyy sisäisen eroosion riski. (Hamade 2013, 19; Jantzer – Knutsson 2007, 7.)

Verrattaessa ylävirtaan ja alavirtaan korotuksissa aiheutuvaa hydraulista gradienttia havaitaan, että alavirtaan korottaessa hydraulinen gradientti on suurempi. Tämä johtuu tiivistyskerroksesta, joka vähentää patopenkerein vedenläpäisevyyttä (kuva 21). Kalvotetussa rakenteessa kyseinen ongelma tulee ilmi ainoastaan tiivisteen vauriotilanteesta. (Jantzer – Knutsson 2007, 7.)



KUVA 21. Hydraulisen gradientin vertailu a) ylävirtaan ja b) alavirtaan korottaessa (Jantzer - Knutsson 2007, 7)

4.1 Täytön konsolidaatiopainuma

Hienorakeisten maalajien kokonaispainuma jaetaan kolmeen osatekijään. Näitä ovat alkupainuma eli rakennusaikainen painuma suljetussa tilassa, primäärinen konsolidaatiopainuma ja sekundaarinen konsolidaatiopainuma avoimessa tilassa. (Vepsäläinen 2004, 2.)

Suljetussa tilassa kuormituksen aiheuttama huokosveden ylipaine ei ole vielä purkautunut. Näin voi tapahtua huonosti vettä läpäiseville maalajeille nopean kuormituksen aikana ja välittömästi sen jälkeen. Suljetun tilan jälkeen tapahtuu primäärinen konsolidaatiopainuma, missä huokosveden ylipaine purkautuu. Huokosveden purkautumisen seurauksena huokostilavuus pienenee ja maa-aines painuu. Avoimessa tilassa tapahtuvassa sekundaarisessa konsolidaatiopainumassa huokosveden ylipaine on jo kokonaan purkautunut, mutta maa-aines edelleen painuu hitaasti. (Vepsäläinen 2004, 3.)

Suurin osa altaaseen läjitetystä jätteen hienorakeisesta osuudesta konsolidoituu heti altaaseen tulon jälkeen oman painonsa vaikutuksesta. Kokonaisuudessaan kuormitetun kaivannaisjätteen painuminen voi kestää kuitenkin vuosia. (Priscu 1999, 10:2; European Commission 2009, 370.)

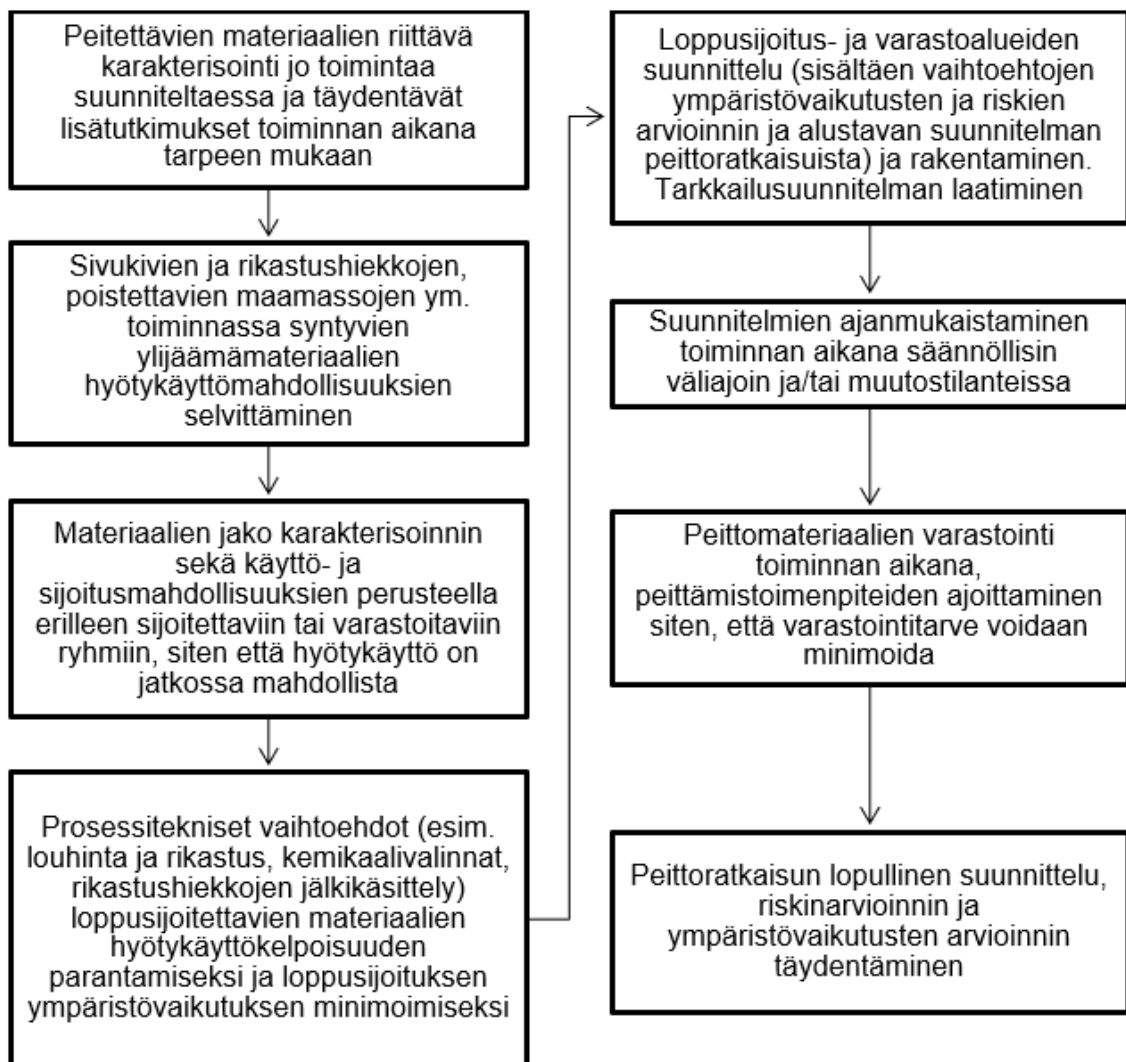
4.2 Huokospaineen kasvu täytössä ja siitä aiheutuvat ongelmat

Yleisesti altaan täytön hallinta on hyvin suoraviivaista, mutta rakenteen tasalaatuisuuden varmistaminen ja huokospaineen kasvun välttäminen eivät ole yhtä ilmiselvää. Kaivannaisjätealtaan padon stabiliteetin kannalta huokospaineella on suuri merkitys. Kasvava huokosvedenpaine vähentää tehokasta jännitystä aiheuttaen stabiliteetin ja liukumiskestävyyden heikkenemisen. (Jantzer – Knutsson 2007, 7; Priscu 1999, 1:8-9.)

Altaan korottaminen normaaleissa olosuhteissa sallii huokospaineen purkautumisen jo rakentamisaikana. Korotustahdin ylittäessä tietyn rajan, huokospaineella ei ole välttämättä aikaa purkautua, minkä seurauksena muodostuu huokosveden ylipaine. Tämän seurauksena läjitetty kaivannaisjäte voi juoksettua ja kalvon vaurioitilanteessa on suurempi riski kaivannaisjätteen kulkeutumiselle suotoveden mukana. (Hamade 2013, 19; Priscu 1999, 1:8-9.)

4.3 Altaiden sulkeminen

Kaivannaisjätealtaiden peittotapa valitaan läjitetyn jätteen pitkäaikaiskäyttäytymisen ja altaassa käytettyjen rakenneratkaisuiden perusteella. Peittorakenteen tavoitteena voi olla esimerkiksi pölyämisen tai kaivannaisjätteen kemiallisen ja fyysikaalisen rapautumisen estäminen. Peittämiseen varautumista voidaan arvioida esimerkiksi kuvan 22 mukaan. Jätealtaiden peittorakenne voidaan tehdä kuiva-peittona tai märkäpeittona. (Kauppila ym. 2011, 175.)



KUVA 22. Kaivannaisjätealueen peittämiseen varautuminen (Kaivoksen sulkemisen käsikirja. 2005, 104)

Kuivapeittorakenne voi muodostua yhdestä maa-aineskerroksesta, useamman maa-aineksen kerrosrakenteesta tai maa-aineksen ja synteettisen materiaalin

yhdistelmä rakenteesta. Kuivapeittorakenteen täytyy olla vettä johtava, mikä to-
teutetaan salaojakerroksella. Lisäksi sen täytyy estää veden kulkeutuminen kai-
vannaisjätetäyttöön. Kalvotetun kaivannaisjätealtaan kuivapeittorakenteen täytyy
olla yhtä vettä läpäisemätön kuin altaan pohjarakenteen. (Kauppila ym. 2011,
175.)

Kalvorakenteita käytettäessä täytyy huomioida auringon valon vaikutus. Auringon
valo voi heikentää kalvoa käytettävästä kalvomateriaalista riippuen. Tästä joh-
tuen kalvot peitetään maa-aineksella. Kalvon alapuolisen ja yläpuolisen kerrok-
sen raekoon tulisi olla pienempi kuin kalvon paksuus. (Kauppila ym. 2011, 177.)

Kaivannaisjätetäytön kantavuuteen tulee myös kiinnittää erityistä huomiota kal-
vorakenteita käytettäessä. Peittokerroksen rakentaminen voi osoittautua erittäin
haasteelliseksi heikosti kantavalla jätetäytöllä. Konsolidaatiopainumat voivat olla
hyvinkin suuria, joten täyttöä voidaan joutua esikuormittamaan ennen varsinais-
ten kalvorakenteiden tekoa. Talviaikaan voidaan hyödyntää jäätynyttä tai jäädy-
tettyä kaivannaisjätetäyttöä peittorakenteiden teossa. (Kipsisakka-altaan 1 sulke-
misen yleissuunnitelma. 2018.)

Märkäpeitolla tarkoitetaan kaivannaisjätteen vesipeittoa tai osittaista vesipeittoa.
Sen tarkoituksena on estää tai vähentää rautasulfidien hapettumista ja siitä ai-
heutuvaa haitallisten aineiden liukenemista. (Kauppila ym. 2011, 177.)

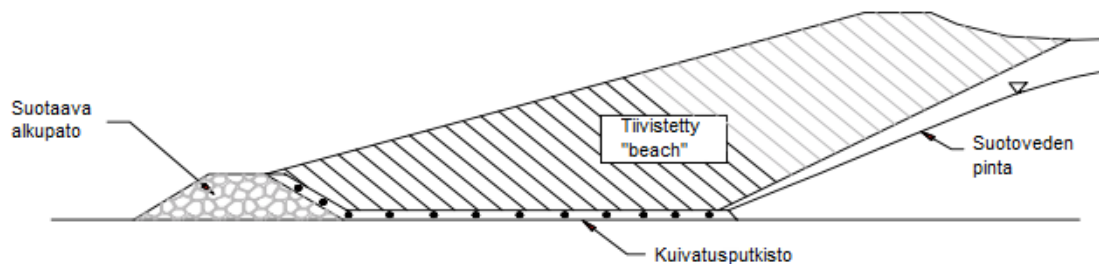
Kaivannaisjätealtaiden peittorakenteiden lisäksi alueelta suotautuvien vesien ke-
rääminen ja puhdistaminen kuuluu sulkemistoimenpiteisiin ja alueen jälkihoitoon.
Kaivannaisjätealtaiden sulkemisen yhteydessä täytyy tehdä jätealtaiden raken-
teille stabiliteettitarkastelu, jossa tutkitaan esimerkiksi padon varmuutta murtu-
mista vastaan. Oleellimmat luiskastabiliteettiin vaikuttavat tekijät ovat padon
leikkauslujuus, luiskakaltevuus, altaan korkeus sekä altaassa olevan suotoveden
pinta. (Kaivoksen sulkemisen käsikirja. 2005, 77-79; Kauppila ym. 2011, 179.)

4.4 Täytön kantavuuden parantamiskeinot

Luiskastabiliteetin kannalta yksinkertaisin parantamiskeino on luiskakaltevuuden
loiventaminen. Kaltevuutta voidaan tarvittaessa loiventaa myös porrastamalla.
Muita stabiliteetin parantamiskeinoja voivat olla esimerkiksi huokospaineen ja

suotovesipinnan alentaminen kuivatusrakenteilla ja tukipenkereen käyttö. Ulko-luiskankasvillisuudella ja vedenjohtamisrakenteilla on myös parantava vaikutus luiskastabiiliteettiin ja ulkoisen eroosion vähentämiseen. (Kaivoksen sulkemisen käsikirja. 2005, 79-95.)

Davies ym. (2002) ovat laatineet parannetun ylävirtaan korotusmenetelmän (kuva 23). Siinä alkupato rakennetaan suotaavana louhepatoon ja altaan reunalle syntyvä kaivannaisjätteen kuiva karkearakeinen osuus tiivistetään esimerkiksi puskukoneella samalla työntäen pengertä eteenpäin. Altaan reunaosaan asennetaan kuivatusjärjestelmä. Luiskakaltevuus on 1:3 tai loivempi, riippuen muista rakenneratkaisuista.



KUVA 23. Parannetun ylävirtaan korotusmenetelmän tyyppipoikkileikkaus (muokattu Davies ym. 2002, 8)

Kaivannaisjätteen suodatuksella tai sakeutuksella voidaan niin ikään parantaa jätetäytön kantavuutta. Suodatuksessa kaivannaisjäte kuivataan erilaisia suodatustekniikoita, esimerkiksi painesuodatusta tai hihnapuristinta, käyttäen. Perinteiseen lietaläjäytyskseen verrattuna suodatettu kaivannaisjäte voi olla kuitenkin huomattavasti kalliimpaa. Suodatettua kaivannaisjätettä ei voida pumpata putkistoa pitkin jätealtaaseen, vaan se täytyy erikseen kuljettaa läjityspaikalle. (European Commission 2009, 404.)

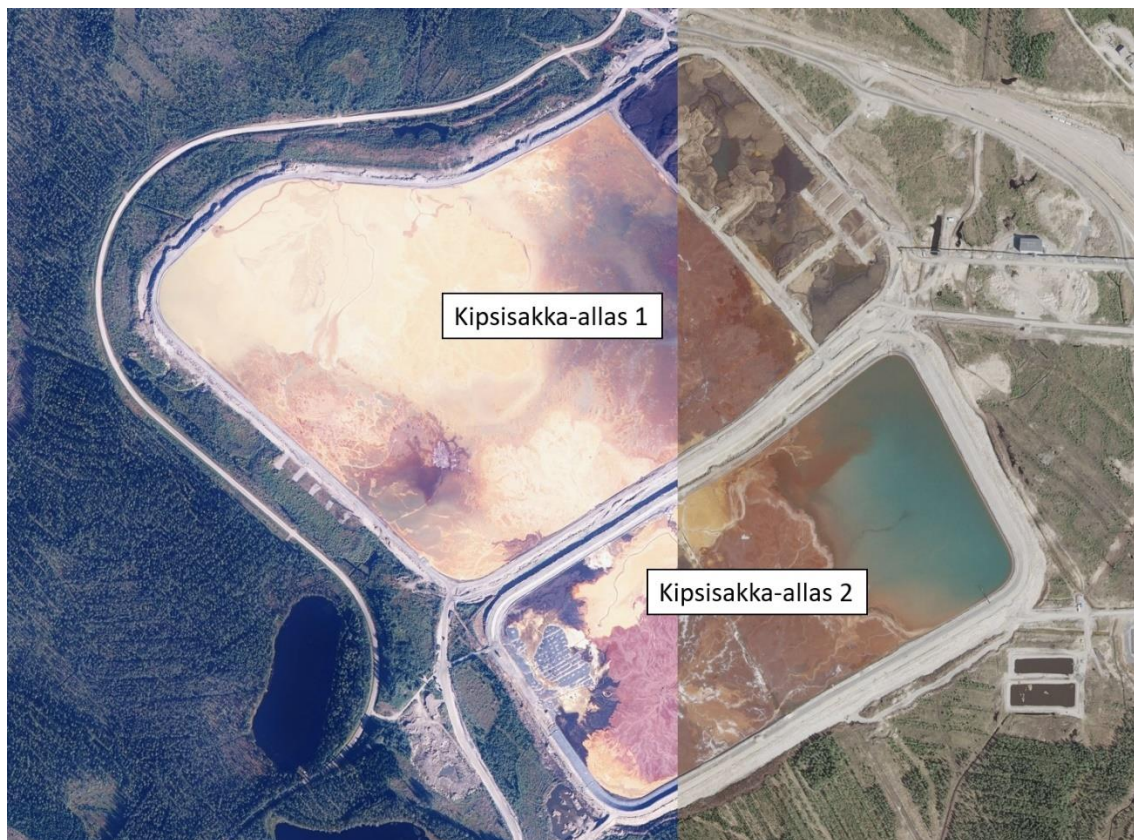
Saostuslaitoksessa kaivannaisjätteestä poistetaan vettä riittävän kiintoainespitoisuuden saavuttamiseksi, mikä on tavallisesti 50-70 %. Sakeutusprosessin jälkeistä kaivannaisjätettä kutsutaan sakeutetuksi kaivannaisjätteeksi tai pastaksi. Sen etuina lietaläjäytyskseen verrattuna ovat muun muassa suurentunut

lajitysaltaan kapasiteetti, suotovesimäärien aleneminen ja alhaisemmat sulke-
mistoimenpiteiden kustannukset. Suurin osa prosessivesistä poistetaan ja palau-
tetaan takaisin rikastukseen sakeutusprosessissa, joten prosessivesiä ei tarvitse
kierrättää jätealtaan kautta. (European Commission 2009, 405.)

Sakeutetun kaivannaisjätteen tai pastan huonona puolena on sen kuljetuksen
vaikeus ja kalliimmat kuljetuksen kustannukset. Tehokkain tapa on rakentaa sa-
ostuslaitos läjitysalueen läheisyyteen. Läjitetyn kaivannaisjätteen pölyäminen voi
olla myös ongelmana. Pölyämisen estämiseen voidaan tarvita kastelujärjestel-
mää, mikä taas lisää kustannuksia. Sakeutus ei myöskään ole paras ratkaisu
happoa tuottaville kaivannaisjätteille. (European Commission 2009, 405-406.)

5 TARKASTELTAVA KAIVANNAISJÄTEALLAS

Tarkasteltavana ovat Sotkamon Tuhkakylässä sijaitsevan Terrafame Oy:n kaivoksen ja metallitehtaan kipsisakka-altaan 2 reunapato ja kipsisakka-altaiden 1 ja 2 välipato. Altaissa oleva kipsisakka johdetaan altaisiin alueen rikastamolta. Kuvassa 24 on Maanmittauslaitoksen aineistosta (Karttapaikka 2018) peräisin oleva ortokuva kipsisakka-altaista. Terrafame Oy:n kaivoksella ja metallitehtaalla tuotetaan nikkeliä, sinkkiä, kobolttia ja kuparia (Terrafame 2018).



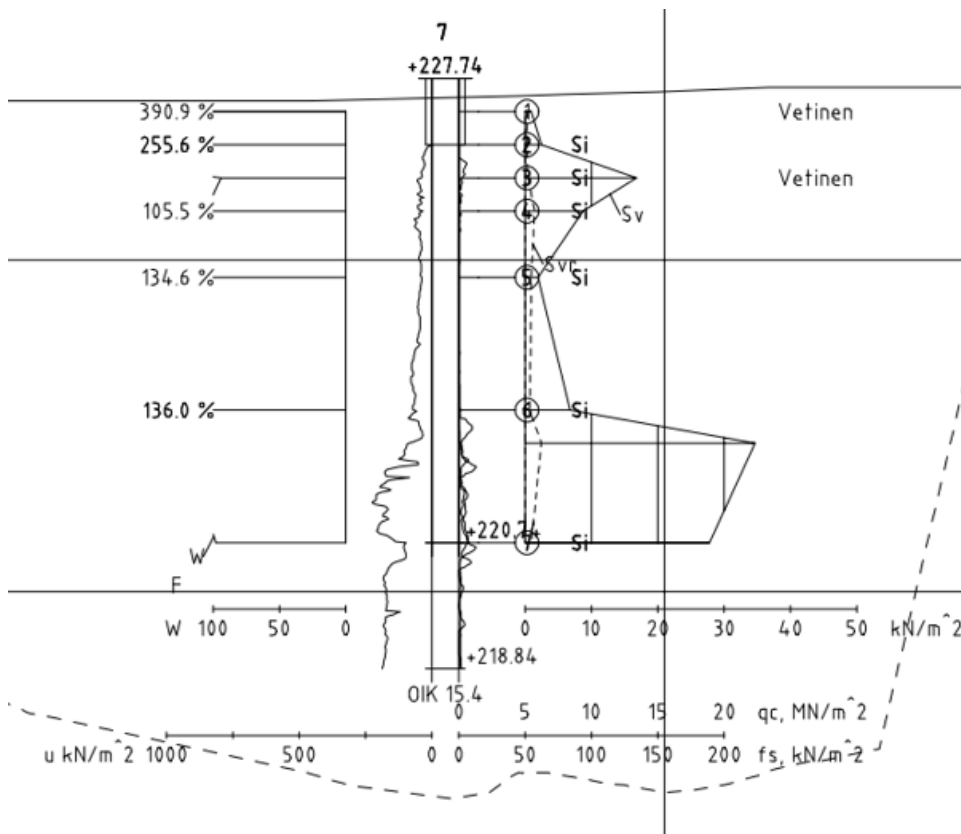
KUVA 24. Kipsisakka-altaat 1 ja 2 (muokattu Karttapaikka 2018)

Kipsisakka-allas 2 on pinta-alaltaan noin 45 hehtaaria ja se muodostuu lohkoista 4, 5 ja 6. Altaan alkupato on rakennettu tasoon +224.00, josta se on korotettu tasoon +228.00. Lohkojen välisiä patoja ei ole korotettu, joten ne ovat peittyneet kipsisakan alle. Kipsisakka-altaalle 2 on laadittu korotussuunnitelma, jossa altaan reunapato ja altaan 1 ja 2 välipato korotetaan tasoon +235.00. (Kipsisakka-altaan 2 korottaminen, riskiarvio. 2018.)

5.1 Kipsisakan ominaisuudet

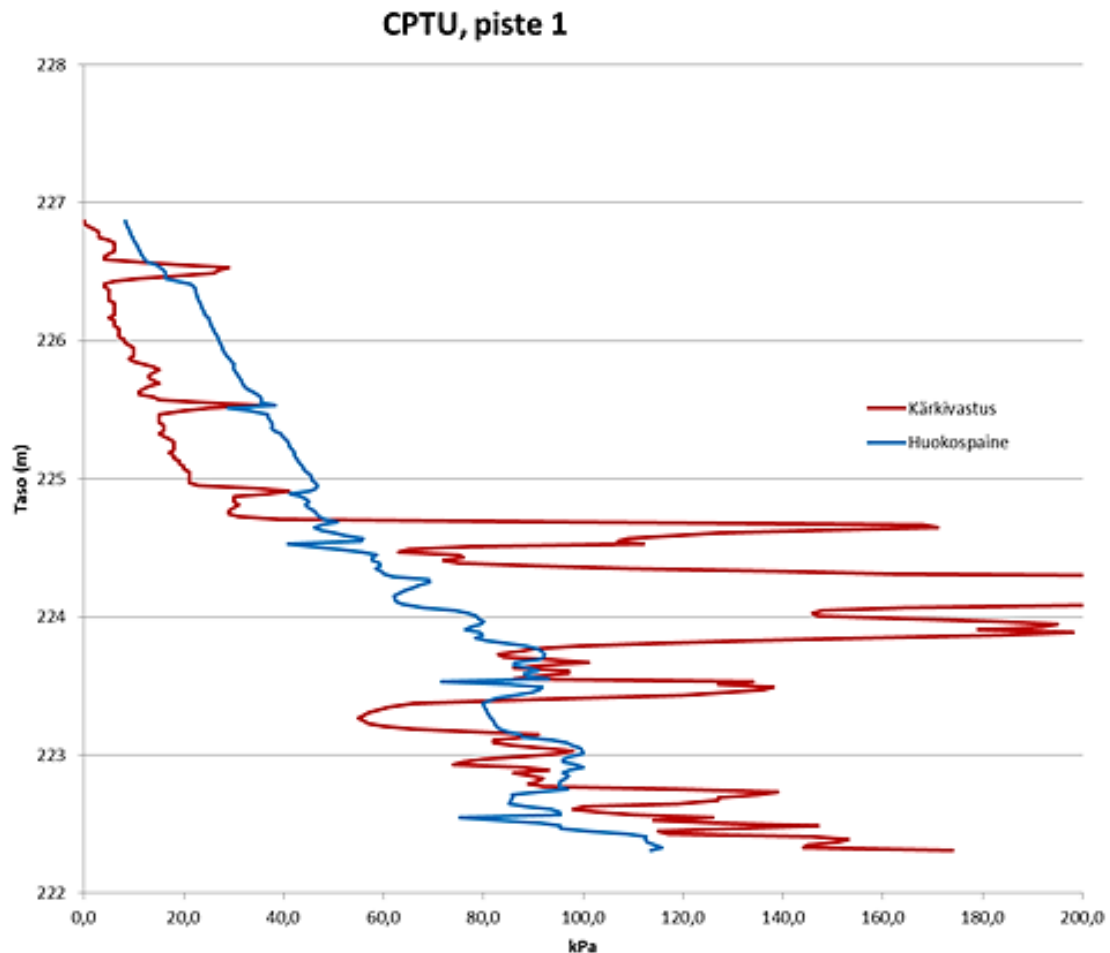
Kipsisakka-altaan 1 sulkemiseen liittyen kipsisakan ominaisuuksien määrittystä varten on tehty vuonna 2018 useita tutkimuksia. Maastotutkimuksiin on kuulunut puristinkairauksia, siipikairauksia ja CPTU-kairauksia. Kairauksia on tehty useissa eri tutkimuspisteissä. Yhdestä pisteestä on myös mitattu huokospaineen purkaantumisnopeus. Laboratoriotutkimuksia varten on otettu useita näytteitä, 13:sta pisteestä on otettu häiriintynyt näyte ja yhdestä pisteestä on otettu häiriintymätön näyte. Tutkimusten tulokset vastasivat kutakuinkin aiempien tutkimusten (luku 3) tuloksia. (Kipsisakka-altaan 1 sulkemisen yleissuunnitelma. 2018.)

Kuvassa 25 on esitetty tutkimuspisteeseen 7 tehdyn siipikairauksen diagrammi. Diagrammista voidaan havaita kipsisakan korkea vesipitoisuus. Kipsisakkatäytön kerroksellisuus näkyy diagrammissa leikkauslujuuden vaihteluina. (Kipsisakka-altaan 1 sulkemisen yleissuunnitelma. 2018.)



KUVA 25. Siipikairausdiagrammi tutkimuspisteestä 7 (Kipsisakka-altaan 1 sulkemisen yleissuunnitelma. 2018)

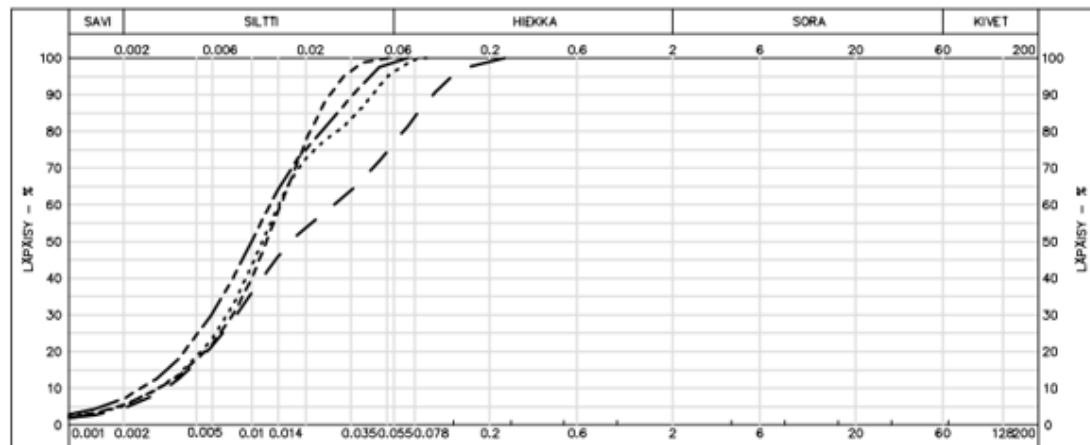
Tutkimuspisteellä 1 tehdyn CPTU-kairauksen kärkivastus ja huokosvedenpaine on esitetty kuvassa 26. CPTU-kairauksen tuloksista voidaan myös havaita kipsisakkatäytön kerroksellisuus. Kohdissa, joissa kärkivastus kasvaa äkillisesti, huokospaine laskee. Tämä voi johtua karkearakeisen aineksen lajittumisesta tai sulamispainuman aiheuttamasta kipsisakan rakenteen muuttumisesta. (Kipsisakka-altaan 1 sulkemisen yleissuunnitelma. 2018.)



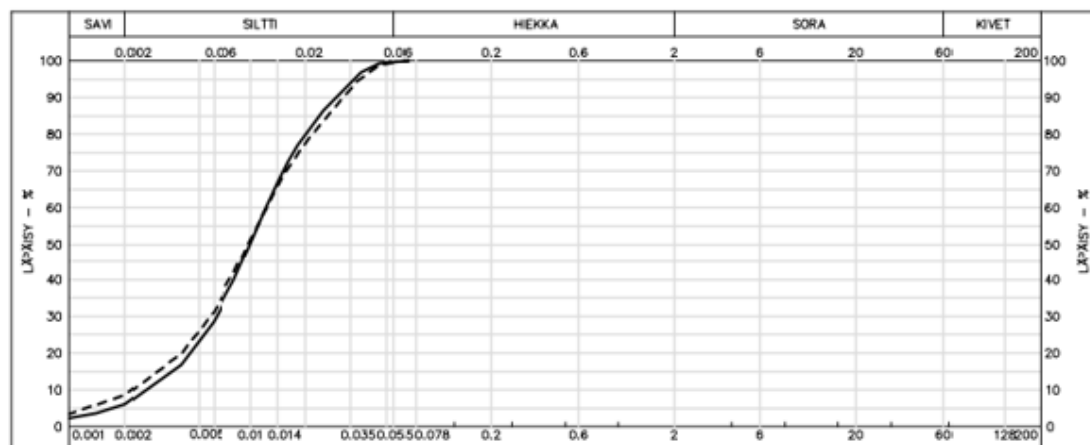
KUVA 26. Tutkimuspisteellä 1 tehdyn CPTU-kairauksen kärkivastus ja huokospaine (Kipsisakka-altaan 1 sulkemisen yleissuunnitelma. 2018)

Oulun yliopiston tekemän rakeisuusmäärittelyn tuloksien perusteella kipsisakka vastaa rakeisuudeltaan keskisilttiä. Määrittely tehtiin partikkelianalysaattorilla. Näytteiden keskiraekoko d_{50} vaihteli välillä 0,006-0,016 mm. Keskimäärin keskiraekoko oli 0,010 mm. Kuvassa 27 on esimerkkinä tutkimuspisteestä 7 määritetyt rakeisuuskäyrät. (Kipsisakka-altaan 1 sulkemisen yleissuunnitelma. 2018.)

7
Näyte 2 ----- 3 4 _ _ _ 5 -----



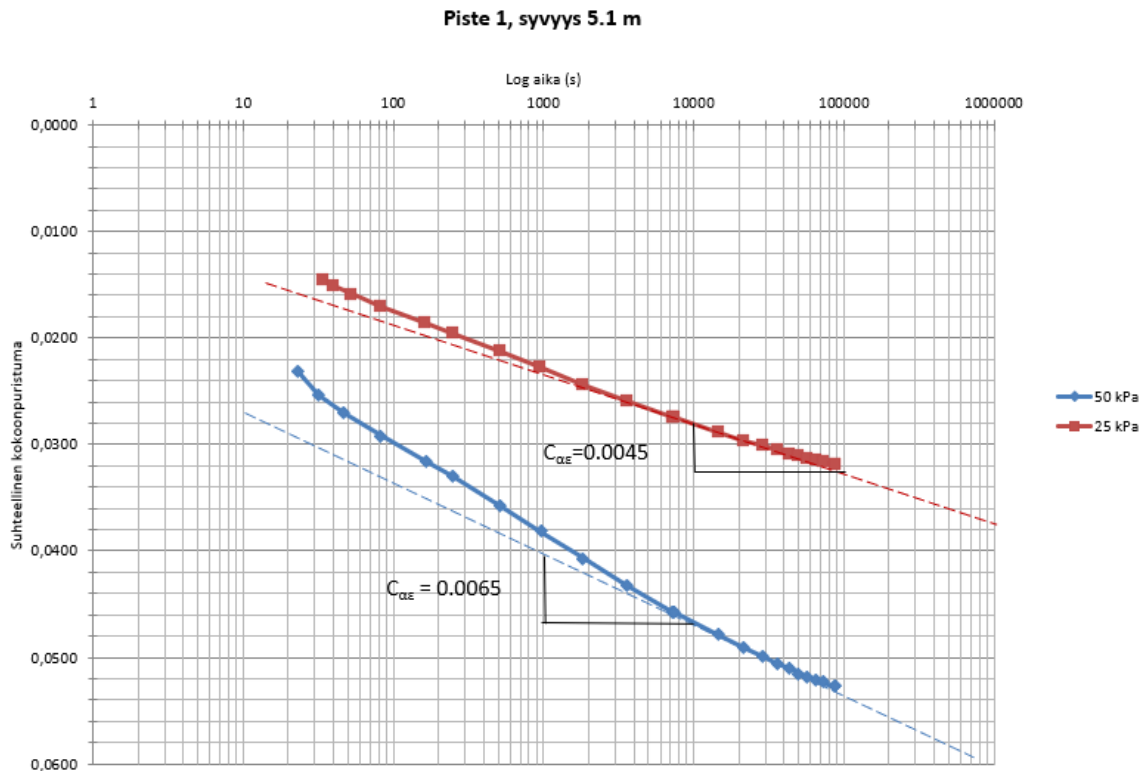
7
Näyte 6 ----- 7 -----



KUVA 27. Tutkimuspisteestä 7 otettujen kipsisakkanäytteiden rakeisuuskäyrät (Kipsisakka-altaan 1 sulkemisen yleissuunnitelma. 2018)

Häiriintymättömille näytteille tehtyjen ödometrikokeiden perusteella määritettiin kokoonpuristuvuusparametrit. Ödometrikokeet suoritti Mitta Oy. Ödometrikokeissa kipsisakka ei käyttäytynyt vastaavan luonnonmateriaalin tavoin. Tutkimuspisteeltä 1 syvyydeltä 3,45 m otetun näytteen moduuliluvuksi m määritettiin 15,0, jännityseksponentiksi β määritettiin 0,0168 ja konsolidaatiokertoimeksi c_v saatiin 165,8 m^2/a . 5,05 m:n syvyydellä moduuliluvuksi m määritettiin 9,5, jännityseksponentiksi β 0,001 ja konsolidaatiokertoimeksi c_v 27,9 m^2/a . (Kipsisakka-altaan 1 sulkemisen yleissuunnitelma. 2018.)

Kuvassa 28 on esitetty 5,05 m:n syvyydeltä otetun näytteen kuormitus-kokoonpuristumakäyrä logaritmisella asteikolla kuormituksen ollessa 25 kPa ja 50 kPa. Kuvassa näkyvät kulmakertoimet ovat sekundaarisia konsolidaatiokertoimia $c_{\alpha \varepsilon}$. Tutkimusten perusteella kipsisakka on voimakkaasti kokoonpuristuvaa. Primääripainuma tapahtuu kuitenkin suhteellisen nopeasti. (Kipsisakka-altaan 1 sulkemisen yleissuunnitelma. 2018.)



KUVA 28. Tutkimuspisteeltä 1 syvyydeltä 5,05 m otetun näytteen kuormitus-kokoonpuristumakäyrä logaritmisella asteikolla kuormituksilla 25 kPa ja 50 kPa (Kipsisakka-altaan 1 sulkemisen yleissuunnitelma. 2018)

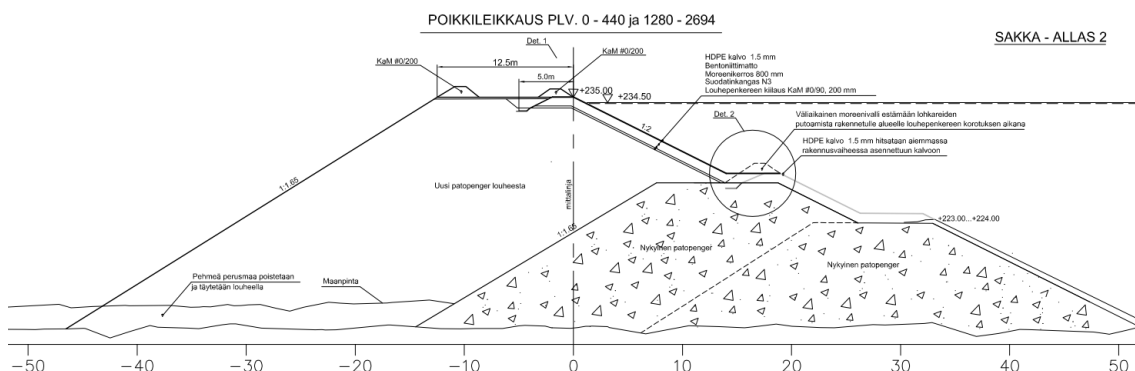
Kipsisakka-altaasta 1 otettujen näytteiden vesipitoisuudet ovat suurimmillaan noin 400-500 %. Häiriintymättömille näytteille määritettiin plastisuusominaisuudet. Juoksurajaksi määritettiin 81-87 %, plastisuusrajaksi 57 % ja plastisuusluvuksi 30 %. Häiriintymättömien näytteiden vesipitoisuus oli 79,3-133,4 %. Tuloksien perusteella todettiin, että näytteiden vesipitoisuus on suurempi kuin juoksurajan vesipitoisuus. Näin ollen kipsisakka on yliherkkää ja se menettää lujuutensa häiriintyessään. (Kipsisakka-altaan 1 sulkemisen yleissuunnitelma. 2018.)

5.2 Kipsisakka-altaan 2 reunapato

Altaan nykyisen reunapadon harja on tasossa +228.00 ja sitä ollaan korottamassa tasoon +235.00. Tällöin padon harja on noin 23 m ympäröivän maanpinnan yläpuolella. Korotus tapahtuu alavirtaan täytöllä. (Kipsisakka-altaan 2 padon korotus tasolle +235.00. 2017.)

Nykyisen reunapadon runko on rakennettu louheesta ja sisäluiskaan on tehty kiilauskerros. Kiilauskerroksen päälle on rakennettu suojakerros moreenista, joka on alkupadon sisäluiskassa 300 mm:n ja toisen vaiheen korotuksessa 800 mm:n paksuinen. Moreenikerroksen päälle on asennettu bentoniittimatto ja 1,5 mm:n vahvuinen HDPE-kalvo. Ulkoluisikan puolelle on tehty rakennekerrokset huoltoliikennettä varten. (Kipsisakka-altaan 2 padon korotus tasolle +235.00. 2017.)

Suunnitellussa korotuksessa uuden patopenkereen runko rakennetaan louheesta, jonka raekoko on #0/600. Sisäluiskaan ja osittain padon harjalle rakennetaan 200 mm paksu kiilauskerros #0/90 kalliomurskeesta, jonka päälle tulee 800 mm:n paksuinen moreenikerros. Näiden kerrosten väliin asennetaan N3-luokan suodatinkangas. Moreenikerroksen päälle tulee bentoniittimatto ja 1,5 mm:n vahvuinen HDPE-kalvo. Kuvassa 29 on ote liitteestä 1, jossa on esitetty tasoon +235.00 korotetun reunapadon suunniteltu tyypipipoikkileikkaus. (Kipsisakka-altaan 2 padon korotus tasolle +235.00. 2017.)



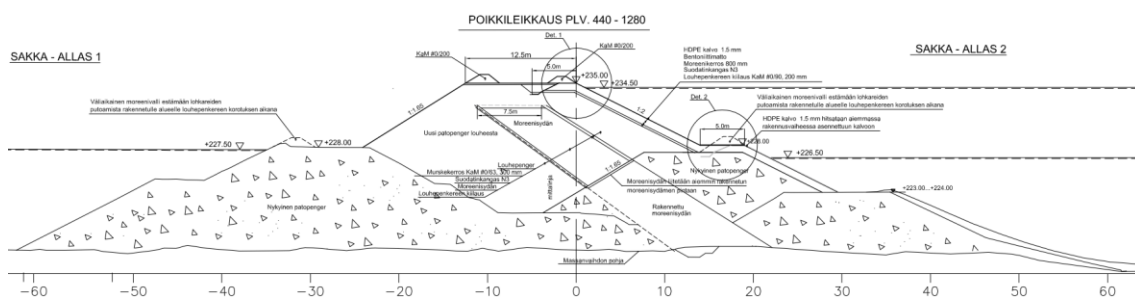
KUVA 29. Tasoon +235.00 korotetun reunapadon tyypipipoikkileikkaus (Kipsisakka-altaan 2 padon korotus tasolle +235.00. 2017)

5.3 Kipsisakka-altaiden 1 ja 2 välipato

Kipsisakka-altaiden 1 ja 2 nykyisen välipadon allas 2:n puoleinen harja on myös tasossa +228.00, josta se korotetaan tasoon +235.00. Korotus tapahtuu alavirtaan täytöllä eli kipsisakka-allasta 1 kohti. (Kipsisakka-altaan 2 padon korotus tasolle +235.00. 2017.)

Patopenkereeseen on rakennettu kalteva moreenitiivistysydän, joka on rakennettu kiilauskerroksen ja louhepenkereen päälle. Tiivistysydämen yläpuolelle on asennettu suodatinkangas ja sen päälle on rakennettu 300 mm paksu #0/63 murskekerros, jonka päällä on louhepenger. Sisäluiskan tiivistysrakenteet ovat samat kuin reunapadossa. (Kipsisakka-altaan 2 padon korotus tasolle +235.00. 2017.)

Uusi välipadon pengerrakennetaan edellistä korotusvaihetta mukaillen. Runko rakennetaan #0/600 louheesta. Tiivistysydän ulotetaan uuteen patopenkereeseen, kuten myös sen ympärysrakenteet, kiilauskerros, N3-luokan suodatinkangas ja 300 mm paksu #0/63 murskekerros. Sisäluiskan tiivistysrakenteina käytetään reunapadon mukaisia rakenteita, jotka ovat 800 mm:n moreenikerros, bentoniittimatto ja 1,5 mm:n vahvuinen HDPE-kalvo. Moreenikerroksen alle tulee N3-luokan suodatinkangas ja 200 mm paksu kiilauskerros #0/90 murskeesta. Kuvassa 30 on ote liitteestä 2, jossa on esitetty tasoon +235.00 korotetun kipsisakka-altaiden 1 ja 2 välipadon tyyppipoikkileikkaus. (Kipsisakka-altaan 2 padon korotus tasolle +235.00. 2017.)



KUVA 30. Tasoon +235.00 korotetun kipsisakka-altaiden 1 ja 2 välipadon tyyppipoikkileikkaus (Kipsisakka-altaan 2 padon korotus tasolle +235.00. 2017)

6 SUOTOVIRTAUKSEN JA HYDRAULISEN GRADIENTIN TARKASTELU

Kipsisakka-altaan 2 korotuksen myötä kasvava kipsisakkatäytön paksuus lisää huokosvedenpainetta altaassa. Tämä ja altaassa oleva vapaa vesi voivat lisätä vuotovesimääriä ja patorakenteisiin kohdistuvaa sisäisen eroosion riskiä padon vuototilanteessa.

Suotovirtauksen ja hydraulisen gradientin tarkastelu on tehty Rocsciencen kehittämällä Slide -ohjelmalla perustuen elementtimenetelmään eli FEM-laskentaan. Ohjelma soveltuu hyvin suotovesimäärien ja hydraulisen gradientin laskentaan 2D-mallinnuksena.

Laskennassa huomioituja materiaaleja ovat läjitetty kipsisakka, louhe, kiilauskerroksen murske, tiivistyskerroksen moreeni ja pohjamoreeni. Bentoniittimatto ja HDPE-kalvo ovat laskentaohjelmaa varten yhdistetty yhdeksi tiivistemateriaaliksi. Muulta osin laskennassa käytetyt rakenteet ovat korotussuunnitelman mukaiset. Laskennan toteutus Slide-ohjelmalla on esitetty liitteessä 3. Laskennassa käytetyt materiaalien kyllästyneen tilan vedenläpäisevyysarvot ovat taulukossa 6.

TAULUKKO 6. Laskennassa käytetyt materiaalien kyllästyneen tilan vedenläpäisevyysarvot

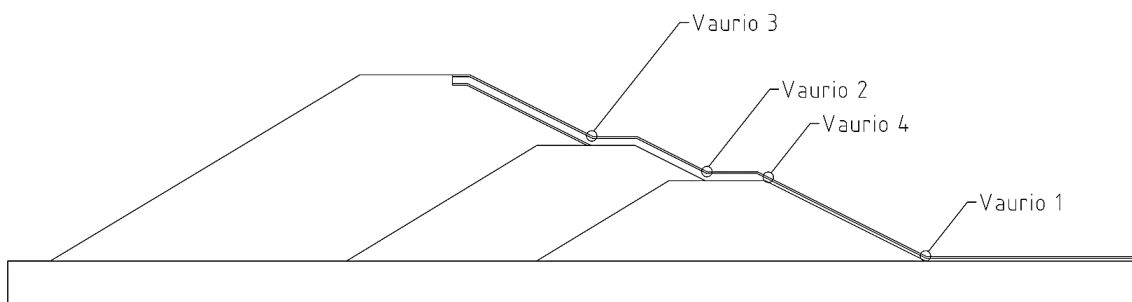
Materiaali	Vedenläpäisevyys k_s (m/s)
Kipsisakka	$2 \cdot 10^{-8}$
Louhe	$1 \cdot 10^{-3}$
Kiilauskerros	$1 \cdot 10^{-5}$
Moreeni	$1 \cdot 10^{-7}$
Tiiviste	$1 \cdot 10^{-13}$
Pohjamoreeni	$1 \cdot 10^{-7}$

6.1 Laskentatapaukset

Laskenta on tehty erilaisille tapauksille, joissa vapaa vesi sijoittuu eri tavoin patopengereeseen nähden. Jokaisessa laskentatapauksessa HDPE-kalvoon ja bentoniittimattoon tulee vaurio, josta altaassa oleva vesi pääsee purkautumaan. Tiivistevauriot on jokaisessa laskentatapauksessa sijoitettu neljään eri kohtaan (kuva 31). Tämän lisäksi jokaisessa eri kohtaan sijoittuvassa tiivistevauriossa on käytetty eri vauriokokoja. Tiivistevaurioiden kokona on käytetty 0,2-2,0 m²:ä. Vapaan veden pinta on laskentatapauksissa tasossa +233.00.

Hydraulisen gradientin tarkastelussa tarkoituksena on tutkia tiivistevauriutilanteiden mahdollisesti aiheuttamaa sisäisen eroosion riskiä. Kriittisin kohta tässä tapauksessa on tiivistemateriaalin alapuolisen moreenikerroksen ja kiilauskerroksen rajapinta. Rajapinnan kriittisenä hydraulisena gradienttina voidaan pitää arvoa $i = 5$. Tämän ylittyessä moreenin hienoaines voi mahdollisesti lähteä suoto-veden mukana kulkeutumaan aiheuttaen sisäisen eroosion riskin.

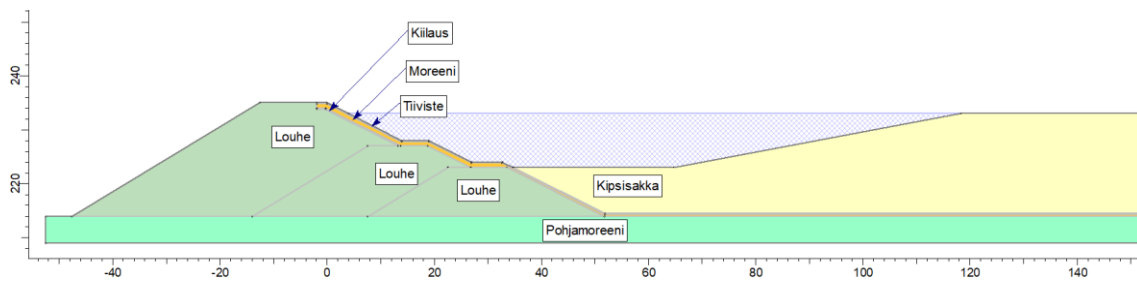
Laskentatapauksissa 1, 2 ja 3 tarkasteltavana on kipsisakka-altaan 2 reunapato. Laskentatapaus 4:ssä on kyseessä kipsisakka-aitaiden 1 ja 2 välipato. Välipadon tarkastelu tehdään lähinnä moreenitiivistyssydämen vaikutuksen arvioinnin kannalta.



KUVA 31. Laskennassa käytetyt tiivistevauriokohdat

6.1.1 Laskentatapaus 1

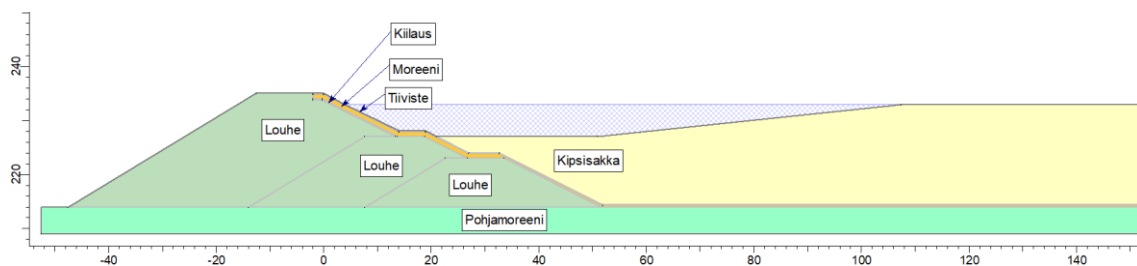
Laskentatapauksessa 1 (kuva 32) vapaa vesi on patopengertä vasten. Patopengertä vasten olevan kipsisakan yläpinta on tasossa +223.00.



KUVA 32. Laskentatapauksessa 1 käytetty tyyppipoikkileikkaus

6.1.2 Laskentatapaus 2

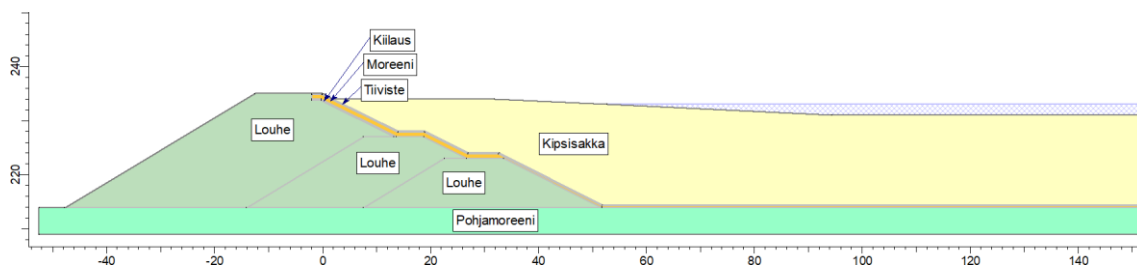
Laskentatapauksessa 2 (kuva 33) vapaa vesi on myös patopengertä vasten. Patopengertä vasten olevan kipsisakkatäytön yläpinta on tasossa +227.0.



KUVA 33. Laskentatapauksessa 2 käytetty tyyppipoikkileikkaus

6.1.3 Laskentatapaus 3

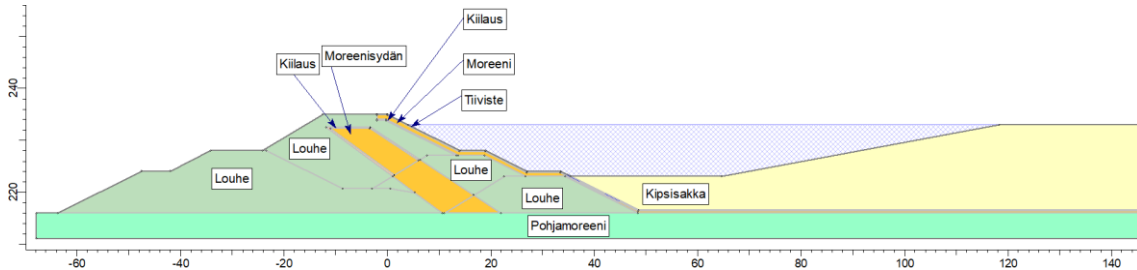
Laskentatapauksessa 3 (kuva 34) vapaata vettä ei varastoida patopengertä vasten. Patopengertä vasten olevan kipsisakkatäytön yläpinta on tasossa +234.00. Kipsisakkatäyttö laskee loivasti tasoon +231.00 siten, että vapaan veden etäisyys patopenkereestä on 30 m.



KUVA 34. Laskentatapauksessa 3 käytetty tyyppipoikkileikkaus

6.1.4 Laskentatapaus 4

Laskentatapauksessa 4 (kuva 35) vapaa vesi on kipsisakka-altaiden 1 ja 2 välipatoa vasten. Patopengertä vasten olevan kipsisakkatäytön yläpinta on tasossa +223.00.



KUVA 35. Laskentatapauksessa 4 käytetty tyyppipoikkileikkaus

6.2 Suotovirtaustarkastelun tulokset

Vauriokohdan ja vapaan veden sijainnilla on huomattava merkitys suotovesimääriin. Laskentatapauksissa, joissa vapaa vesi sijoittuu patopengertä vasten, ovat suurimmat suotovesimäärät. Kipsisakan läjittäminen patopengertä vasten vähentää suotovirtausta merkittävästi vauriotilanteessa.

Vapaan veden sijainnilla ei ole alkupadon juureen syntyvän tiivistevaurion aiheuttaman suotovirtaaman kannalta juurikaan merkitystä. Välipadon moreenitiivistesydän vähentää padon läpi kulkeutuvaa suotovirtaamaa, mutta laskennassa ei voida huomioida padon suuntaisesti tapahtuvaa virtausta. Suotolaskennan tulokset on esitetty taulukossa 7. Liitteessä 4 on nähtävillä laskentatulosteita eri laskentatapauksista.

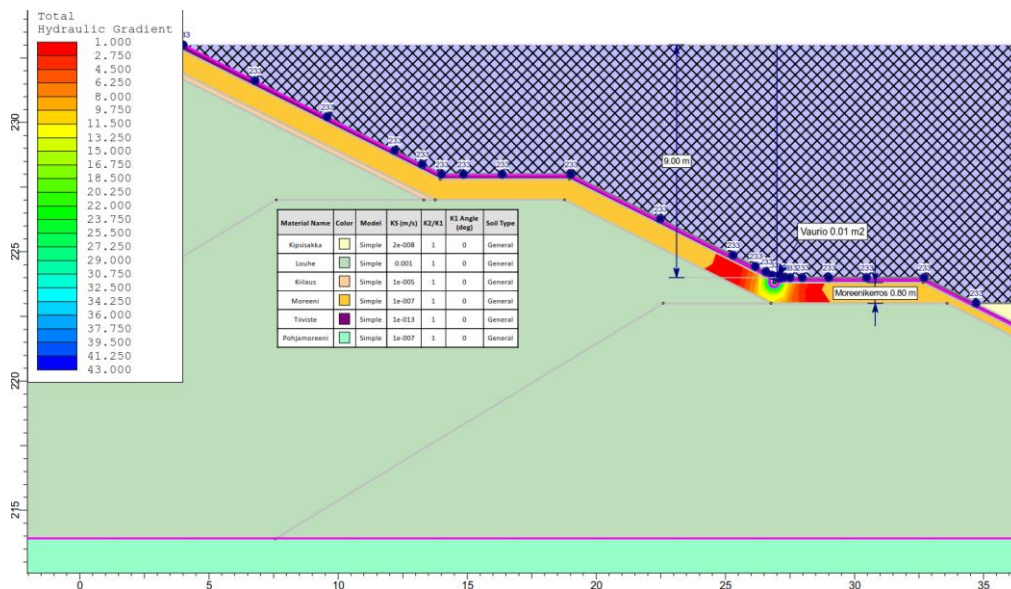
TAULUKKO 7. Laskennalliset suotovirtaamat laskentatapauksissa erikokoisilla ja eri kohtaan sijoittuvilla tiivistevaurioilla

Laskentatapaus	Vaurion koko	Suotovirtaama (l/vrk)			
		Vaurio 1	Vaurio 2	Vaurio 3	Vaurio 4
1	0,20 m ²	11	32	20	68
	1,00 m ²	20	55	30	290*
	2,00 m ²	26*	75	64	496
2	0,20 m ²	10	1,8	28	3,0
	1,00 m ²	18	3,8	41*	4,2
	2,00 m ²	23	5,3	80	5,5
3	0,20 m ²	9,2	0,8*	0,5	1,1
	1,00 m ²	15	1,1	0,6	1,4
	2,00 m ²	18	1,1	0,7	1,7
4	0,20 m ²	5,0	25	17	72
	1,00 m ²	9,4	78	33	131*
	2,00 m ²	12	123	51	219

**Laskentatuloste liitteessä 1*

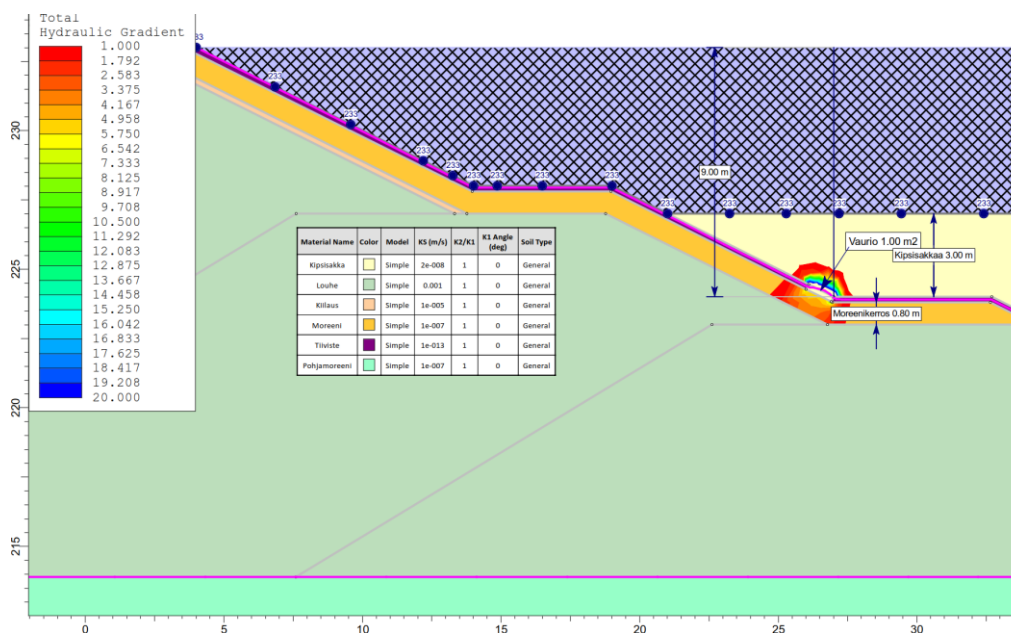
6.3 Hydraulisen gradientin tarkastelu

Vapaan veden ollessa patopengertä vasten kriittinen hydraulinen gradientti ylittyy laskennallisesti jo tiivistevaurion ollessa noin 0,01 m². Kuvassa 36 on esitetty laskentatapauksessa 1 syntynyt, kriittisen arvon ylittävä hydraulinen gradientti vauriotapaus 2:n ollessa 0,01 m².



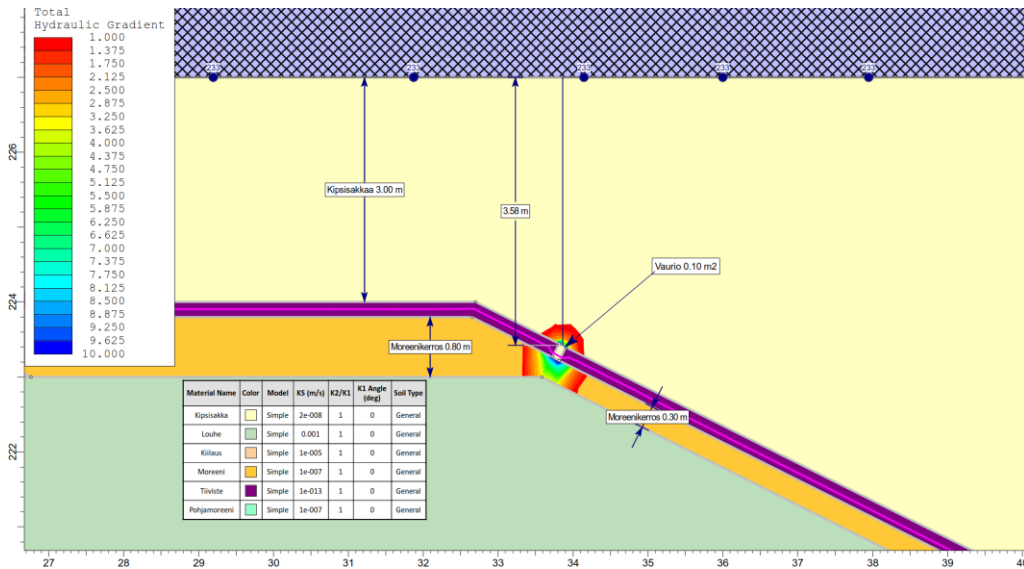
KUVA 36. Hydraulinen gradientti, laskentatapaus 1 ja vauriotapaus 2. Kriittinen hydraulinen gradientti ylittyy tiivistevaurion ollessa 0,01 m²

Vauriokohdan ollessa kipsisakkatäytön peittämä tiivistevaurion tulee olla huomattavasti suurempi, jotta kriittinen hydraulinen gradientti ylittyy. Kuvassa 37 nähdään, että laskentatapauksessa 2 vauriotapauksen 2 kriittinen hydraulinen gradientti ylittyy tiivistevaurion ollessa noin 1,0 m² eli vauriokoko on satakertainen edelliseen tilanteeseen (kuva 36) verrattuna.



KUVA 37. Hydraulinen gradientti, laskentatapaus 2 ja vauriotapaus 2. Kriittinen gradientti ylittyy tiivistevaurion ollessa 1,0 m²

Kriittisin kohta hydraulisen gradientin ja sisäisen eroosion kannalta on alkupadon sisäluiskan yläosa, missä moreenikerroksen paksuus on 0,3 m. Kuvassa 38 ilmenee kriittisen hydraulisen gradientin ylitys laskentatapauksessa 2 vauriotapauksen 4 ollessa $0,1 \text{ m}^2$. Vauriokohdan päällä on noin 3,5 m altaaseen läjitettyä kipsisakkaa.



KUVA 38. Hydraulinen gradientti, laskentatapaus 2 ja vauriotapaus 4. Kriittinen gradientti ylittyy tiivistevaurion ollessa $0,1 \text{ m}^2$

Hydraulisen gradientin tarkastelun johtopäätökset

Kipsisakkatäyttö toimii erinomaisena suojakerroksena vähentäen suotovirtaamaa ja sen aiheuttamaa hydraulista gradienttia tiivistevauriotilanteessa. Vapaan veden ollessa patopengertä vasten jo pieni reikä tiivisteessä aiheuttaa sisäisen eroosion riskin.

Kriittisimmäksi kohdaksi padossa osoittautui alkupadon sisäluiskan yläosa. Laskennallisesti tiivistevaurion täytyy olla noin $0,1 \text{ m}^2$:n kokoinen, jotta kriittinen hydraulinen gradientti ylittyy. Tämän kokoinen reikä voi käytännössä syntyä vain mekaanisen vaurion tai asennusvirheen seurauksena. Vertaamalla tiivistevauriokohtaa 2 ja 4 havaitaan, että moreenikerroksen paksuudella on suuri merkitys sisäisen eroosion riskin kannalta. Tiivistevauriokohdassa 2 moreenikerroksen paksuus on 0,8 m ja vastaavasti tiivistevauriokohdassa 4 moreenikerroksen paksuus on 0,3 m.

Korotussuunnitelman (Kipsisakka-altaan 2 padon korotus tasolle +235.00. 2017) mukaan moreenikerroksen ja kiilauskerroksen väliin asennetaan suodatinkangas, joka estää moreenin hienoaineksen kulkeutumisen vuototilanteessa. Laajan vuotokraaterin synty on näillä rakenneratkaisuilla hyvin epätodennäköistä. Padon ollessa louherunkoinen patosortuman todennäköisyys on myös olematon. Pato-turvallisuuden kannalta suurin riski on kipsisakassa ja prosessivesissä olevien haitallisten aineiden kulkeutuminen vuotovesien matkassa ympäristöön.

7 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tarkastella osana kalvotetun kaivannaisjätealtaan korotuksen riskiarvioita, tiivistevaurion aiheuttamaa suotovirtausta ja sen seurauksena patopenkereeseen mahdollisesti syntyvää sisäisen eroosion riskiä. Alkuvaiheessa työssä käsiteltiin kalvotettujen kaivannaisjätealtaiden rakenteita ja käytettyjä altain korotusmenetelmiä. Kaivannaisjätteiden ominaisuuksiin perehtyessä havaittiin, että rikastuksessa syntyneiden kaivannaisjätteen indeksi- ja geotekniset ominaisuudet voivat vaihdella paljoltikin.

Työssä tutustuttiin myös kalvotetun kaivannaisjätealtaan korottamiseen liittyviin haasteisiin. Hienorakeisen ja suuren vesipitoisuuden omaavan kaivannaisjätteen peittorakenteiden teko altaan sulkemisvaiheessa voi osoittautua todella haastavaksi. Tähän liittyen työssä tuotiin esiin mahdollisia kaivannaisjätetäytön stabiiliiteetin ja kantavuuden parantamiskeinoja.

Suotovirtauksen ja hydraulisen gradientin tarkastelu suorettiin Rocsciencen Slide-ohjelmistolla. Tarkastelussa tiivistevaurio sijoitettiin eri kohtaan patopenkereeseen nähden. Lisäksi vauriokoon merkitystä näissä tilanteissa tutkittiin. Suotovirtaustarkastelun tuloksista nähtiin, että vapaan veden sijainnilla patopenkereeseen nähden on suuri merkitys suotovesimäärien kannalta.

Hydraulisen gradientin tarkastelussa todettiin kipsisakkatäytön toimivan hyvänä suojakerroksena tiivistevauriotilanteessa. Kipsisakkatäyttö myös suojaa kalvoa mahdollisilta mekaanisilta vaurioilta. Vapaan veden ollessa suoraan patopengertä vasten jo pieni vaurio tiivisteessä aiheuttaa sisäisen eroosion riskin. Tarkastelun perusteella laskentatapaus 3 osoittautui parhaimmaksi vaihtoehdoksi suotovesimäärien ja sisäisen eroosion riskin kannalta, koska siinä vapaata vettä ei varastoida suoraan patopengertä vasten.

Läjäyttämällä kipsisakkaa patopengertä vasten ja pitämällä vapaa vesi kauempana padosta, parannetaan kaivannaisjätealtaan patoturvallisuutta. Kipsisakka-altaassa esitettyjen rakenneratkaisuiden käyttö minimoi sisäisen eroosion ja patosortuman riskin. Suurin riskitekijä patoturvallisuuden kannalta on haitallisten aineiden kulkeutuminen ympäristöön vuototilanteessa.

LÄHTEET

Bhanbhro, Riaz 2017. Mechanical Behavior of Tailings: Laboratory Tests from a Swedish Tailings Dam. Doctoral Thesis. Luleå: Luleå University of Technology, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering. Saatavissa: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-62534>. Hakupäivä 20.7.2018.

Bjelkevik, Annika – Knutsson, Sven 2005. Swedish Tailings: Comparison of Mechanical Properties Between Tailings and Natural Geological Materials. Securing the Future: International Conference on Mining and the Environment, Metals and Energy Recovery: Proceedings. S. 117-129. Saatavissa: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-28132>. Hakupäivä 20.7.2018.

Cole, John – Walls, Justin – Collins, Ricky 2014. Husab Tailings Storage Facility Containment Design. Proceedings of Geosynthetics Mining Solutions. Vancouver: InfoMine Inc. Saatavissa: [http://www.gseworld.com/content/documents/Other/Husab Tailings Storage Facility Containment Design 3.pdf](http://www.gseworld.com/content/documents/Other/Husab_Tailings_Storage_Facility_Containment_Design_3.pdf). Hakupäivä 20.7.2018.

Davies, Michael – Lighthall, Peter – Rice, Steve – Martin, Todd 2002. Design of Tailings Dams and Impoundments. Keynote Address Tailings and Mine Waste Practices SME. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/242300046_Design_of_Tailings_Dams_and_Impoundments. Hakupäivä 22.7.2017.

EPA, U.S. Environmental Protection Agency 1994. Design and Evaluation of Tailings Dams. Technical Report. Saatavissa: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/2000EF89.PDF?Dockey=2000EF89.PDF>. Hakupäivä 22.7.2018.

European Commission 2009. Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities. Saatavissa: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/mmr_adopted_0109.pdf. Hakupäivä 20.7.2018.

Hamade, Tarek 2013. Geotechnical Design of Tailings Dams – A Stochastic Analysis Approach. Doctoral Thesis. Montreal: McGill University, Department of Mining and Materials Engineering. Saatavissa: http://digitool.library.mcgill.ca/R/-?func=dbin-jump-full&object_id=116869&ilo_library=GEN01. Hakupäivä 19.7.2018.

Himmi, Matti 2007. Kaivosteollisuuden rikastushiekan ja sivukivien BAT-vertailuasiakirjan sanasto. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/10138/43142>. Hakupäivä 20.7.2018.

Hu, Li-ming – Wu, Hui – Zhang, Lin – Zhang, Pengwei – Wen, Qingbo 2016. Geotechnical Properties of Mine Tailings. Journal of Materials in Civil Engineering. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/308124760_Geotechnical_Properties_of_Mine_Tailings. Hakupäivä 21.7.2018.

Isomäki, Eija – Maijala, Timo – Sulkakoski, Mikko – Torkkel, Milla (Toim.) 2012. Patoturvallisuusopas. Hämeen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. Saatavissa: http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Vesien_kaytto/Padot_ja_patoturvallisuus/Opas. Hakupäivä 20.7.2018.

Jantzer, Isabel – Knutsson, Sven 2007. Seepage and Critical Hydraulic Gradients in Tailings Dams and Natural Formations. In Proceedings of the 2nd International Conference on Porous Media and its Applications in Science and Engineering, ICPM2. Saatavissa: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn%3Anbn%3Ase%3Altu%3Adiva-37701>. Hakupäivä 20.7.2018.

Kaivoksen sulkemisen käsikirja. 2005. Kaivostoiminnan ympäristötekniikka-projekti. Espoo: GTK, VTT, Outokumpu Oyj, Maa ja Vesi Oy, Outokumpu Mining Oy, Salvor Oy, Tieliikelaitos. Saatavissa: http://tupa.gtk.fi/julkaisu/erikoisjulkaisu/ej_053.pdf. Hakupäivä 18.7.2018.

Karttapaikka 2018. Maanmittauslaitos. Saatavissa: <https://asiointi.maanmittauslaitos.fi/karttapaikka>. Hakupäivä 25.7.2018.

Kauppila, Päivi – Räisänen, Marja Liisa – Myllyoja, Sari 2011. Metallimalmikai-vostoiminnan parhaat ympäristökäytännöt. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/10138/37056>. Hakupäivä 20.7.2018.

Kipsisakka-altaan 1 sulkemisen yleissuunnitelma. 2018. Terrafame Oy/Pöyry Finland Oy. Suunnitelma-asiakirjat.

Kipsisakka-altaan 2 korottaminen, riskiarvio. 2018. Terrafame Oy. Raportti. Pöyry Finland Oy. Lausunnon asiakirja.

Kipsisakka-altaan 2 padon korotus tasolle +235.00. 2017. Terrafame Oy:n kai-voshanke. Destia Oy/Terrafame Oy. Suunnitelma-asiakirjat.

Klohn Crippen Berger 2017. Study of Tailings Management Technologies. MEND Report 2.50.1. Saatavissa: http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2.50.1Tailings_Management_TechnologiesL.pdf. Hakupäivä 22.7.2018.

Korhonen, K-H – Gardemaister, R – Tammirinne, M 1974. Geotekninen maaluokit-
kus. Geotekniikan laboratorio, tiedonanto. Otaniemi: Valtion teknillinen tutkimus-
keskus.

L 26.6.2009/494. Patoturvallisuuslaki. Maa- ja metsätalousministeriö. Saata-
vissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2009/20090494>. Hakupäivä 20.7.2018.

Laitinen, Toni 2014. Hopeakaivoksen rikastushiekan hyödyntäminen. Diplomityö.
Oulu: Oulun yliopisto, prosessitekniikan koulutusohjelma.

Lehmikangas, Marko 2018. Suunnittelupäällikkö, Pöyry Finland Oy. Keskustelut
kesän 2018 aikana.

Leskelä, Antti 2005. Maapatojen suunnittelun ja rakentamisen perusteet. Pato-
turvallisuuden täydennyskoulutusohjelma. Maa- ja metsätalousministeriö.

Lupo, J.F. – Morrison, K.F. 2007. Geosynthetic design and construction ap-
proaches in the mining industry. Geotextiles and Geomembranes vol. 25. S. 96-
108. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.07.003> (vaatii käyttö-
jälisenssin/maksamisen). Hakupäivä 20.7.2018.

Priscu, Caius 1999. Behavior of Mine Tailings Dams Under High Tailings Deposition Rates. Doctoral Thesis. Montreal: McGill University, Department of Mining and Metallurgical Engineering. Saatavissa: http://digitool.library.mcgill.ca/R/-?func=dbin-jump-full&object_id=35928&silo_library=GEN01. Hakupäivä

23.7.2018.

Rantamäki, Martti – Jääskeläinen, Raimo – Tammirinne, Markku 2006. Geotekniikka. 21., muuttumaton painos. Helsinki: Otatieto.

RIL 157-1-1985. 1985. Geomekaniikka I. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL.

Saarela, Jouko 1990. Kaivosjätteiden geoteknisistä ominaisuuksista ja ympäristövaikutuksista. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja – sarja A. Helsinki: Vesi- ja ympäristöhallitus.

Sivonen, Mikko – Frilander, Reetta 2001. Patoturvallisuuden toteutuminen Suomen jäte- ja kaivospadoilla. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/40386>. Hakupäivä 18.7.2018.

Terrafame. 2018. Terrafame Oy. Saatavissa: <https://www.terrafame.fi/terrafame-oy.html>. Hakupäivä 1.8.2018.

Touze-Foltz, Nathalie – Lupo, John – Barroso, Madalena 2009. Geoenvironmental applications of geosynthetics. EuroGeo4. S. 1-98. Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/303249467_Geoenvironmental_applications_of_geosynthetics. Hakupäivä 20.7.2018.

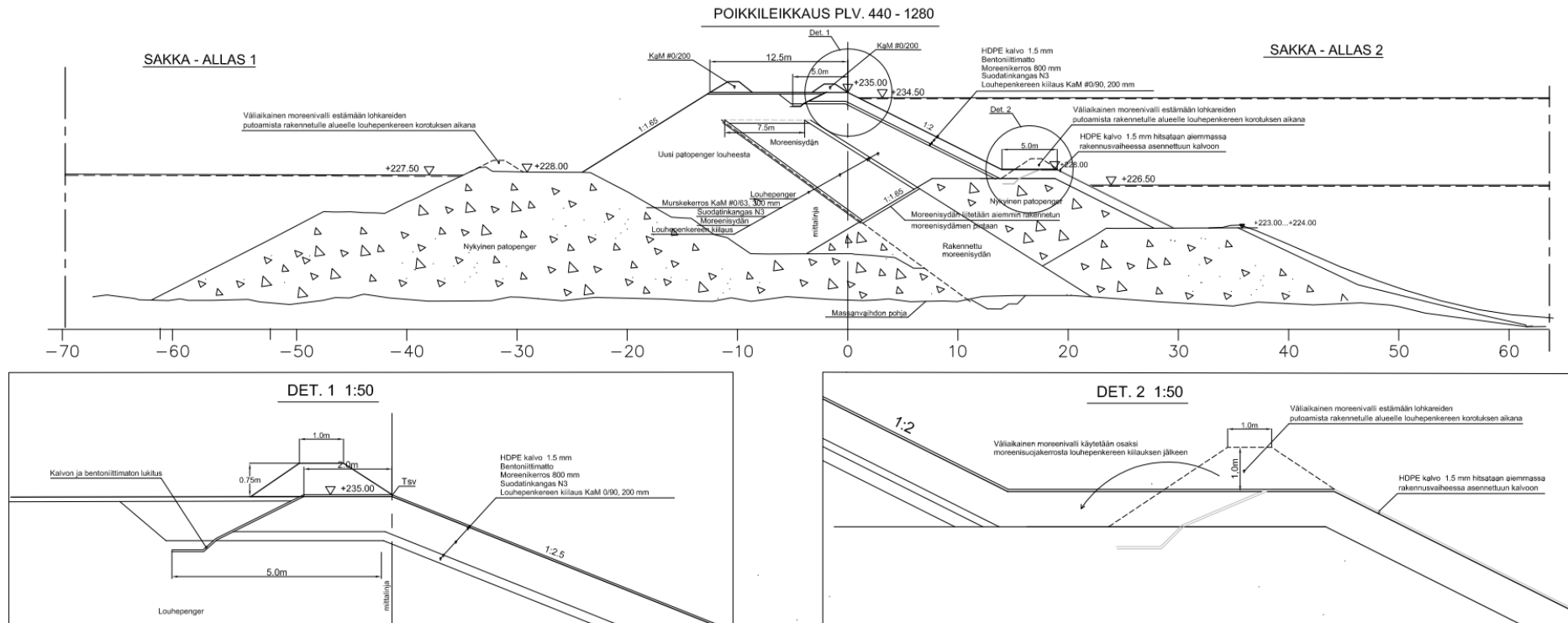
Tuomela, Anne 2016. Synteettiset materiaalit kaivosten allasrakenteiden tiivisrakenteena. Oulun yliopisto. Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7B1211682B-C795-4048-8833-CE269B784441%7D/116739>. Hakupäivä 18.7.2018.

Vepsäläinen, Pauli 2004. Painumien laskenta. Patoturvallisuuden täydennyskoulutusohjelma. Maa- ja metsätalousministeriö.

Zardari, Muhammad Auchar 2011. Stability of Tailings Dams: Focus on Numerical Modelling. Licentiate Thesis. Luleå: Luleå University of Technology, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering. Saatavissa: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-18427>. Hakupäivä 20.7.2018.

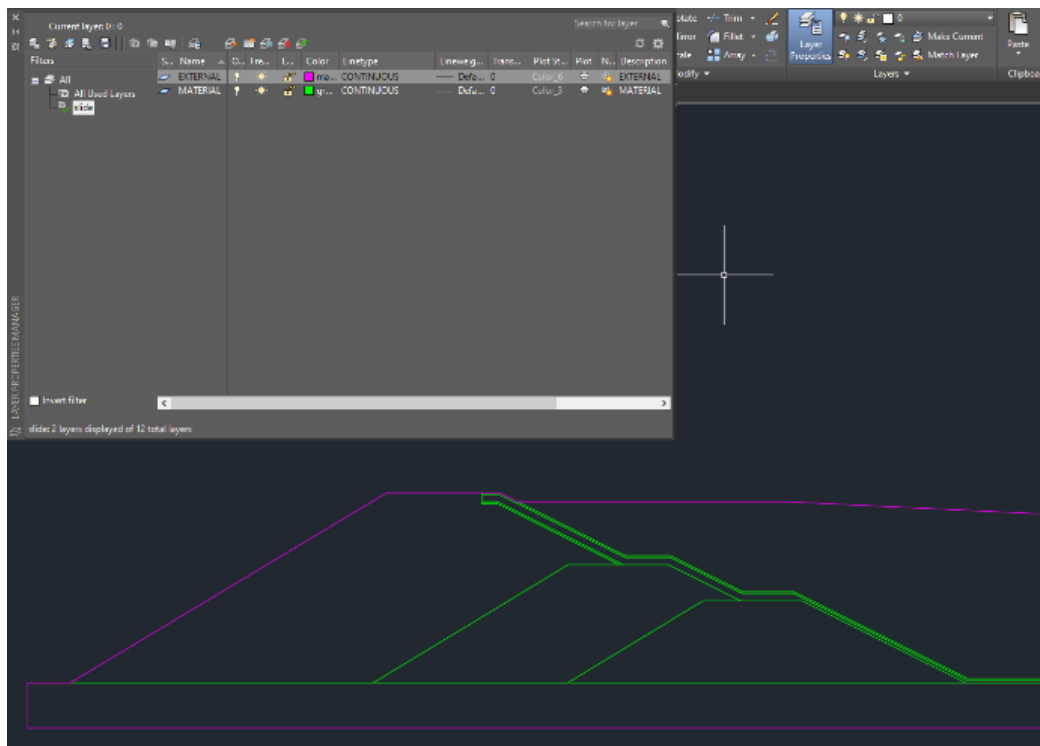
LIITE 1





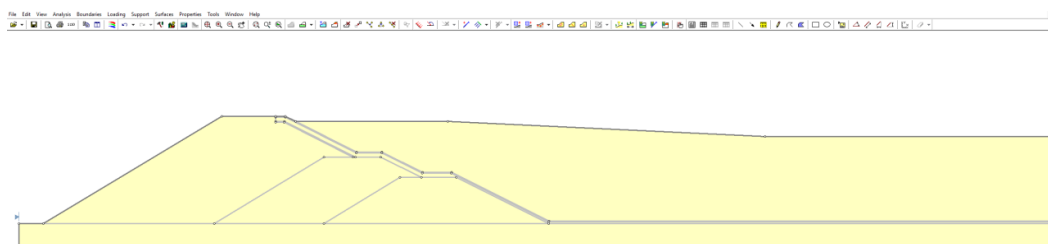
(Kipsisakka-altaan 2 padon korotus tasolle +235.00. 2017)

Ensimmäisenä tarkasteltavan kohteen, tässä esimerkissä kyseessä on laskentatapaus 3, ulkoraja ja materiaalien rajat tehdään Autodeskin AutoCAD-suunnitteluohjelmistolla. Näin tehdään, koska rajojen teko on helpompaa AutoCADilla, tosin rajojen muokkaus voidaan tehdä kuitenkin tarvittaessa Slidessa. Ulkorajan täytyy olla suljettu ja se asetetaan EXTERNAL-tasolle. Materiaalirajat asetetaan MATERIAL-tasolle. Tehtyjen rajaviivojen täytyy olla näillä tasoilla, jotta niiden tuonti Slideen onnistuu (kuva 1). Vapaan veden pintaa ei määritetä tässä vaiheessa. Tiedosto tallennetaan DXF-formaattiin.



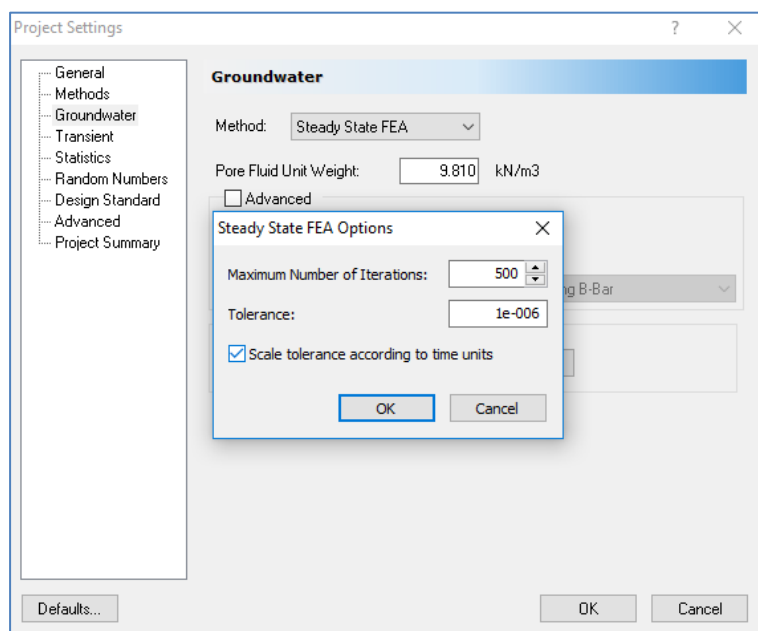
KUVA 1. Tarkastelukohteen ulkorajan ja materiaalirajojen määrittäminen

Seuraavaksi tarkastelukohteen rajat tuodaan Slideen. Ensin tuodaan kohteen ulkoraja, jonka jälkeen materiaalirajojen tuonnin voi tehdä. Kuvassa 2 näkyy tuodut ulkoraja ja materiaalirajat.



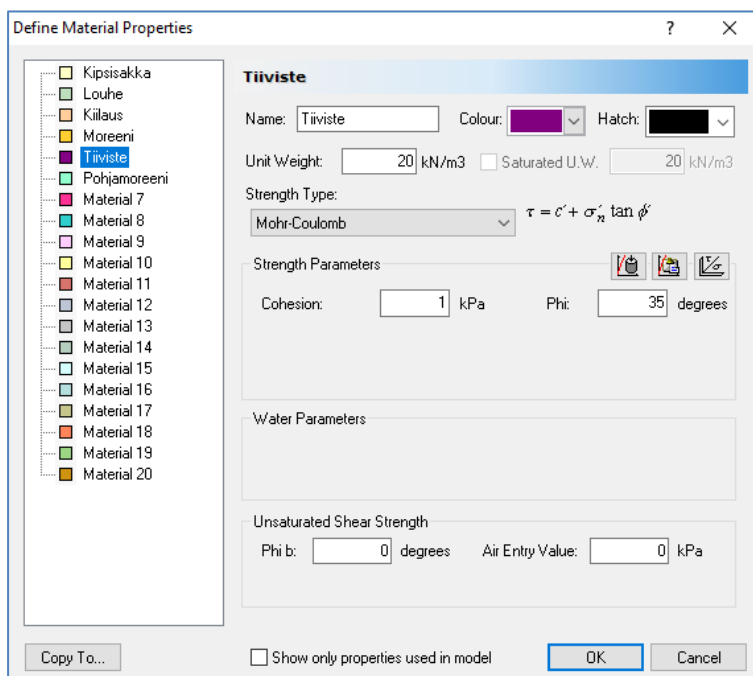
KUVA 2. Ulkoraja ja materiaalirajat tuotuna Slideen

Analysis-välilehdeltä löytyy Project Settings-valikko, jossa asetetaan halutut projektiasetukset. Tässä tapauksessa Groundwater-valikosta vaihdetaan menetelmäksi jatkuva elementtianalyysi (Steady State FEA). FEA-options-painikkeen kautta voidaan asettaa laskennan iteraatioiden enimmäismäärä ja toleranssi (kuva 3). Project Summary-valikossa annetaan projektin nimi, laskennan tiedot, tekijä ja muita tarvittavia tietoja. Nämä annetut tiedot näkyvät tulosteen nimiössä.



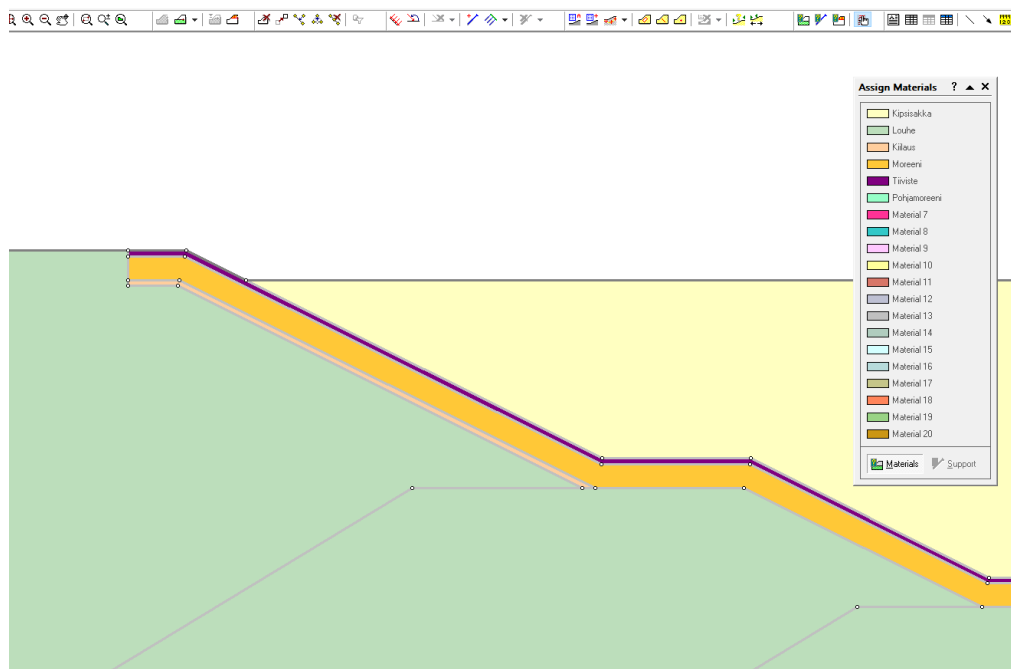
KUVA 3. Projektiasetusten muuttaminen

Materiaalit määritetään Properties-välilehden Define materials-valikosta (kuva 4). Tarvitavat materiaalit nimetään ja niiden esitystapaa voidaan muuttaa väreillä sekä erilaisilla rasterikuvioinnilla. Tilavuuspainolla ja muilla arvoilla tässä valikossa ei ole tämän laskennan kannalta merkitystä. Ne ovat lähinnä stabiliteettilaskentaa varten, mikä voidaan myös tällä ohjelmalla suorittaa.



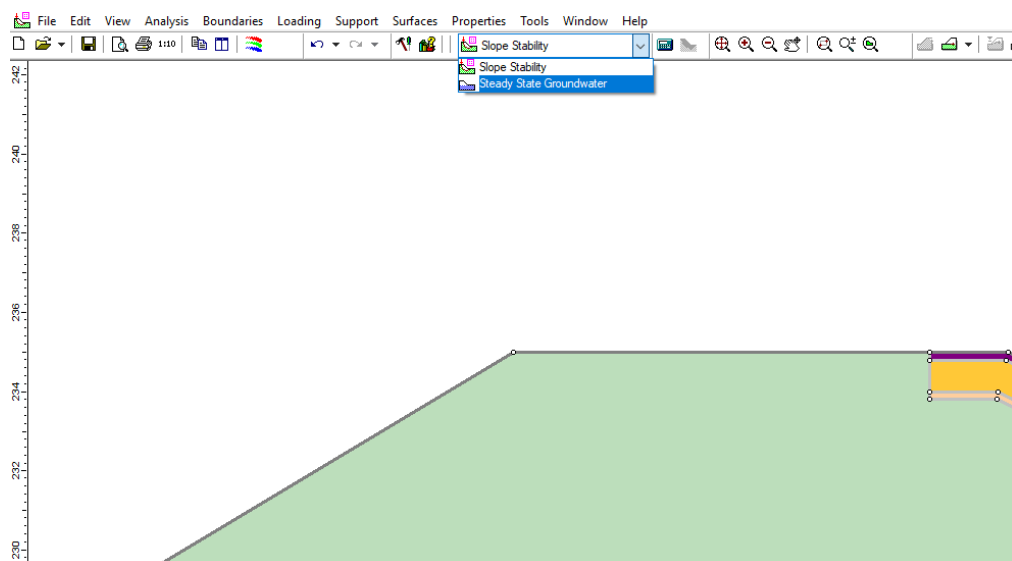
KUVA 4. Materiaalien määrittäminen

Materiaalien määrittämisen jälkeen materiaalit voidaan asettaa laskentamalliin. Properties-välilehdeltä löytyvällä Assign Properties-toiminnolla (kuva 5) asetetaan materiaalit haluttuun kohtaan.



KUVA 5. Materiaalien asettaminen laskentamalliin

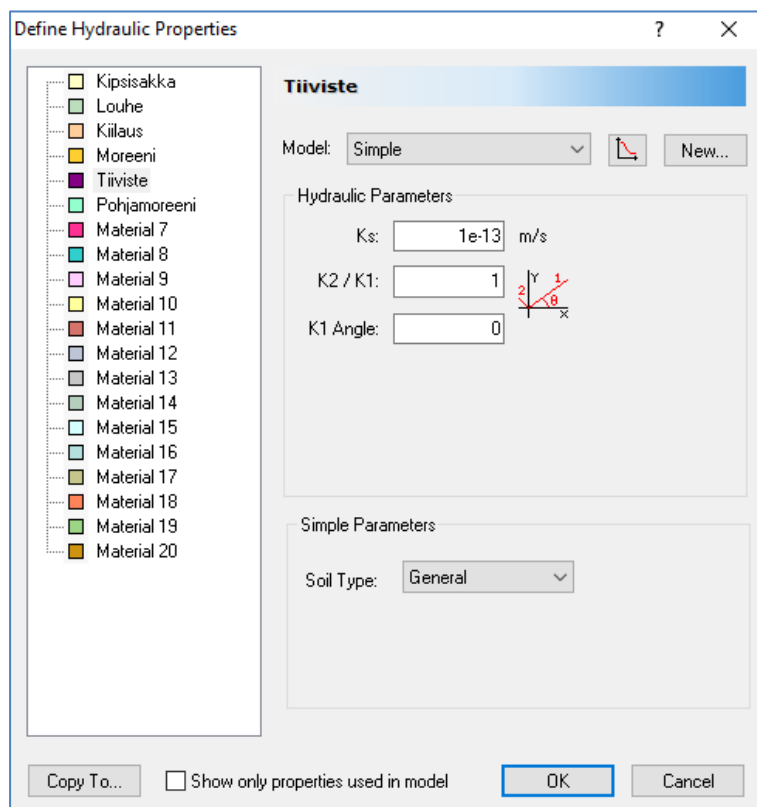
Ohjelma on tässä vaiheessa luiskastabiliteetin laskentatilassa (Slope Stability). Tätä laskentaa varten vaihdetaan laskentatila (kuva 6) suotovesilaskentaan (Steady State Groundwater).



KUVA 6. Laskentatilan vaihtaminen

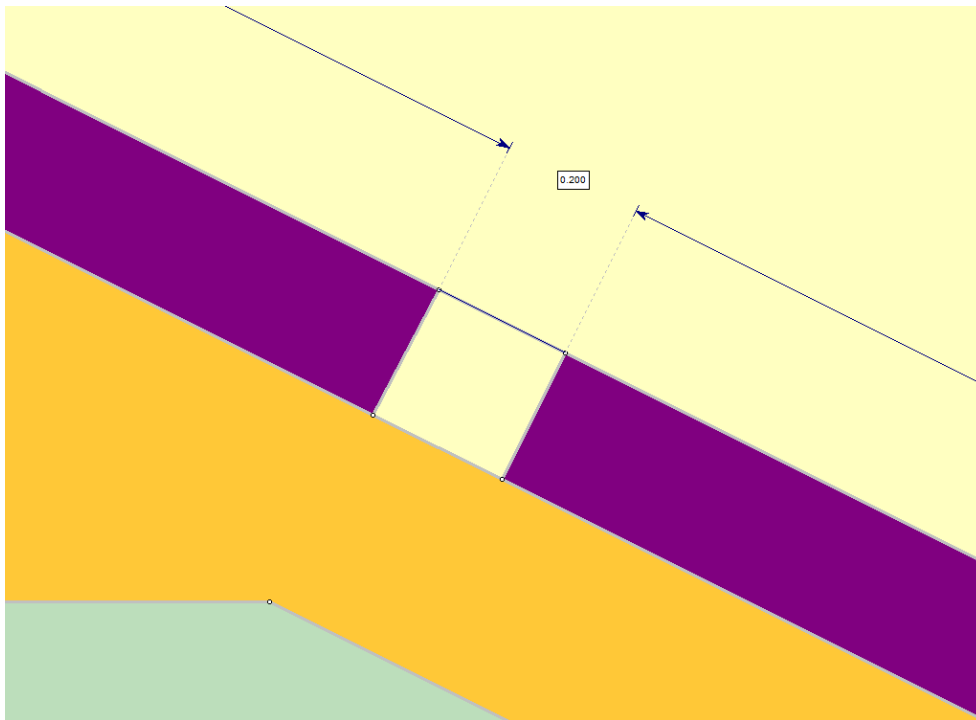
Suotoveden laskentatilassa Properties-välilehdeltä valitaan Define Hydraulic Properties-valikko (kuva 7), jossa materiaaleille annetaan kyllästyneen tilan (K_s) vedenläpäisevyysarvot. Anisotrooppiselle materiaalille voidaan myös määrittää eri suuntaiset vedenläpäisevyysarvot kohtiin K_2/K_1 ja K_1 Angle. K_2/K_1 on kerroin, joka määrittää suhteellisen vedenläpäisevyyden suorakulmaisesti K_1 -arvoon nähden. K_1 Angle on kulma, joka määrittää K_1 vedenläpäisevyyden suunnan. K_2/K_1 arvon vieressä oleva pieni kuva täsmentää tätä. Esimerkiksi K_1 kulman ollessa 0 ja K_2/K_1 ollessa 0.2, vaakasuora vedenläpäisevyys on K_s ja pystysuora vedenläpäisevyys on $0.2 \cdot K_s$.

Laskentamenetelmää voidaan halutessa vaihtaa. Valittavana on yksinkertainen, Brooks ja Coreyn yhtälö, Fredlundin ja Xingin yhtälö, Gardnerin yhtälö ja van Genuchtenin yhtälö. Oman laskentakaavan teko on myös mahdollista. Maalaji voidaan myös valita tavallisen, hiekan, siltin, saven ja hiesun väliltä. Tässä laskennassa laskentamenetelmä, anisotrooppiset määritelmät ja maalaji jätettiin oletusvalinnalle eli laskentamenetelmänä on yksinkertainen, $K_2/K_1 = 1$, K_1 kulma = 0 ja maalaji on tavallinen.



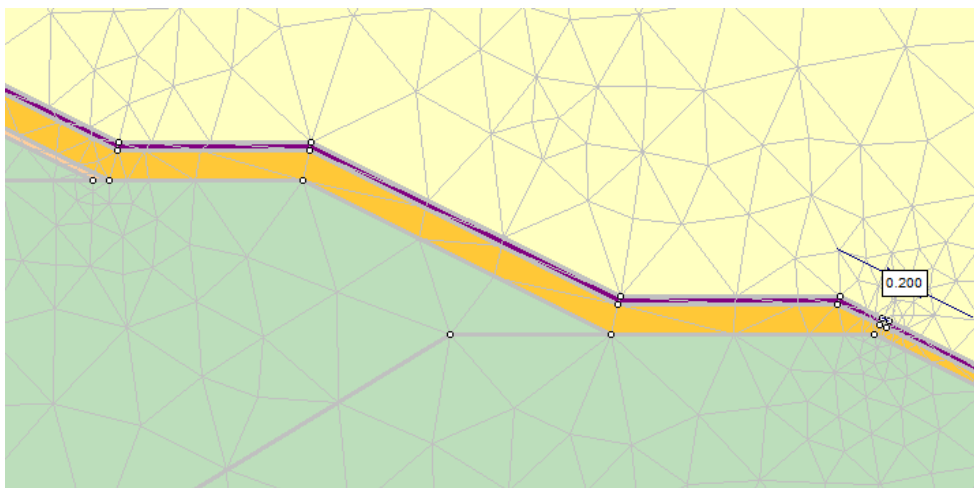
KUVA 7. Materiaalien hydraulisten ominaisuuksien määrittäminen

Materiaalien hydraulisten ominaisuuksien määrittämisen jälkeen mallinnetaan tiivistevaurio eli reikä. Tätä varten täytyy mennä takaisin luiskastabiiliteetin laskentatilaan, koska materiaalirajojen piirto onnistuu ainoastaan kyseisessä laskentatilassa. Boundaries-välilehdeltä valitaan Add Material Boundary ja tiivistevaurion reunat piirretään esimerkiksi mittastyoökalua apuna käyttäen (kuva 8). Tässä laskentaesimerkissä mallinnetaan vauriokohta 4:n mukaan sijoittuva 0,2 m²:n kokoinen tiivistevaurio. Vaurion ollessa kipsisak-
katäytön alapuolella voidaan olettaa sen täyttyvän kipsisakasta, joten erillisen suuren vedenläpäisevyyden omaavan materiaalin käyttö vauriokohdassa ei ole tarpeen.



KUVA 8. Tiivistevaurion mallinnus

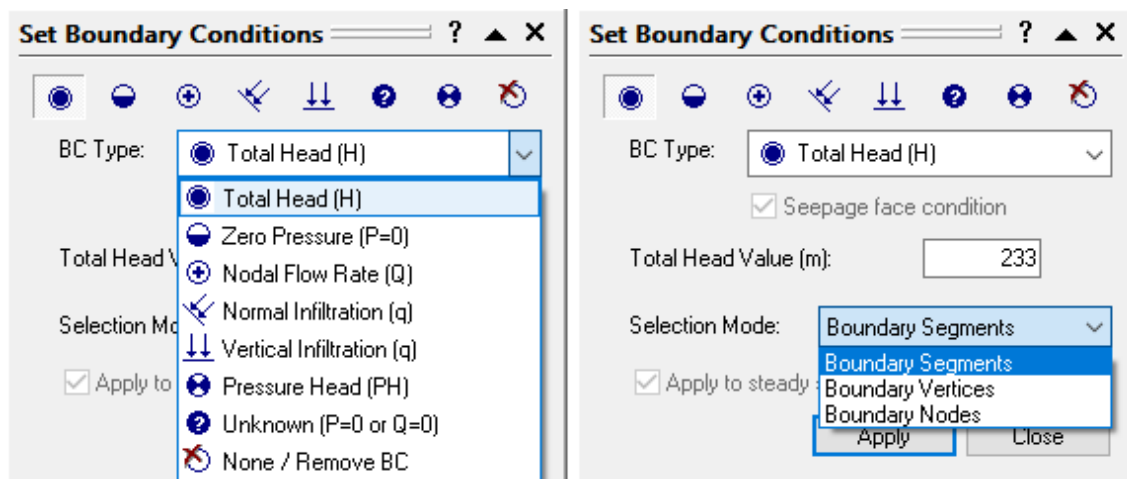
Seuraavana voidaan luoda elementtiverkko malliin, mitä varten siirrytään suotoveden laskentatilaan. Mesh Setup-valikosta voidaan muun muassa muuttaa likimääräistä elementtien määrää ja elementin tyyppi voidaan valita erilaisten kolmio- ja nelikulmioelementtien väliltä. Tässä tapauksessa käytetään oletusvalintoja, likimääräisenä elementtien määränä on 1500 ja elementtityyppinä on kolmisivuinen kolmio. Kun elementtiverkon asetukset on määritetty, diskretisoidaan malli ja luodaan elementtiverkko (kuva 9).



KUVA 9. Elementtiverkko

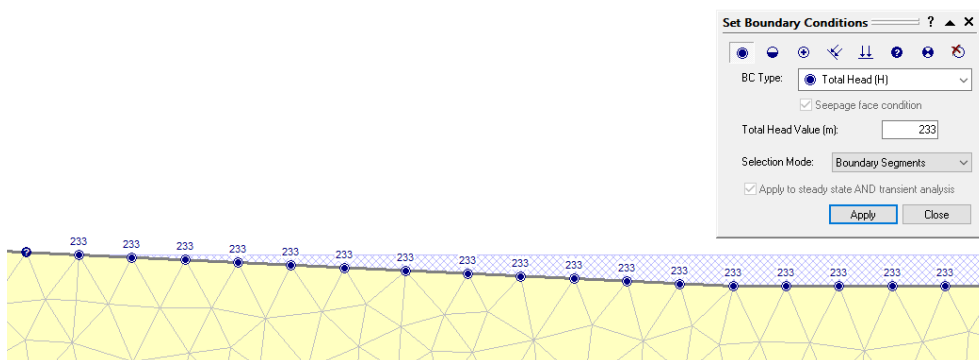
Discharge-välilehdeltä valitaan Add Section-toiminto ja asetetaan poikkileikkaus haluttuun kohtaan, esimerkkilaskennassa poikkileikkaus asetetaan sisäluiskan puoleiselle padon harjan reunan kohdalle. Ohjelma laskee suotovesimäärät tämän poikkileikkauksen kohdalta.

Reunaehdot määritetään Set Boundary Conditions-toiminnolla (kuva 10). Asetettavan reunaehdon tyyppi valitaan BC Type-valikosta. Tässä tapauksessa käytetään kokonaispainetta (Total Head), jolla määritetään vapaan veden alue. Kokonaispaineen korkeudeksi laitetaan 233 m ja valintatavaksi otetaan reunajana (Boundary Segments).



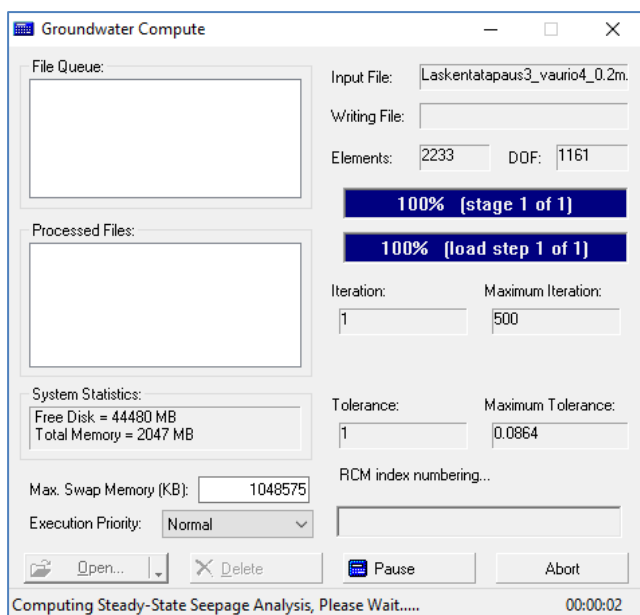
KUVA 10. Reunaehtoien määrittäminen

Valittu reunaehto asetetaan valitsemalla halutussa kohdassa olevat rajaviivat. Ennen reunaehdon asettamista on hyvä laittaa ylimääräinen piste korkeudelle 233.00 luiskaa kuvaavaan viivaan, jotta vapaa vesi rajautuisi siihen eikä se menisi sitä ylemmäs. Kuvassa 11 näkyy asetettu vapaa veden alue.



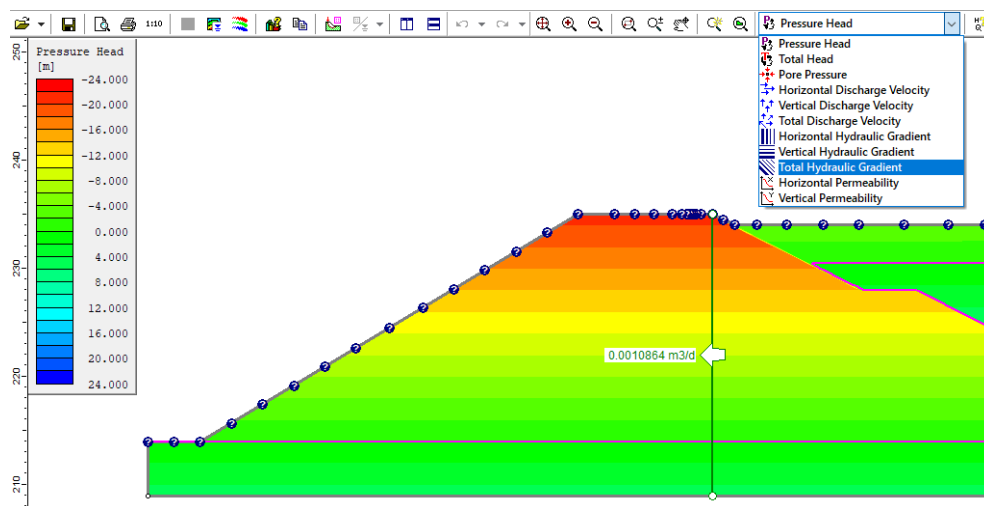
KUVA 11. Vapaa vesi kipsisakkatäytön päällä

Tämän jälkeen voidaan suorittaa suotovesilaskenta Compute (groundwater)-toiminnolla (kuva 12). Laskennan valmistuttua siirrytään tarkastelemaan tuloksia painamalla Interpret (groundwater results)-painiketta.



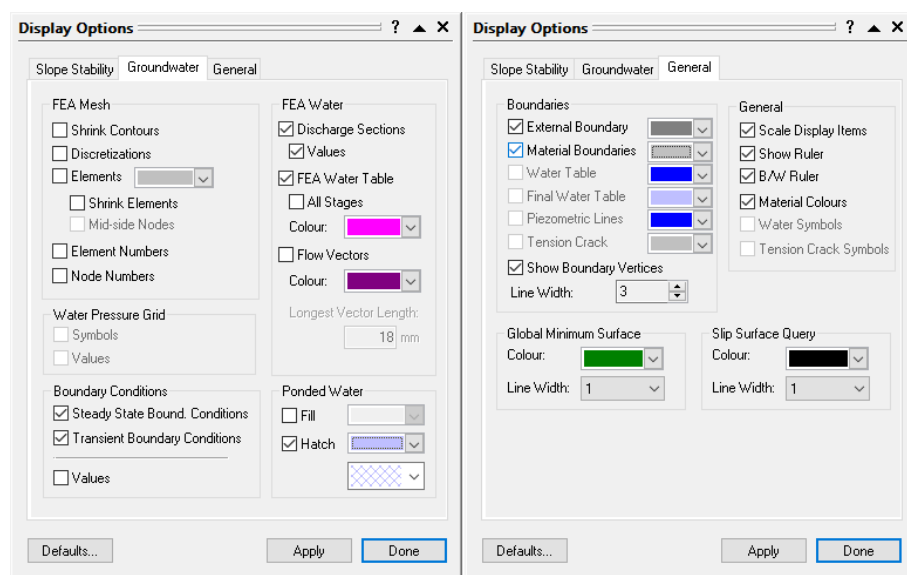
KUVA 12. Suotovesilaskennan suoritus

Tulosten tarkastelutilassa saadaan näkyviin useita eri tietotyyppejä (kuva 13), kuten painekorkeus, kokonaispaine, huokosvedenpaine ja eri suuntaiset virtausnopeudet, hydrauliset gradientit ja vedenläpäisevyydet. Tässä tapauksessa tarkastellaan suotovesimääriä ja hydraulista gradienttia, joten valitaan yhteen laskettu hydraulinen gradientti (Total Hydraulic Gradient). Poikkileikkausviivan kohdalla näkyy suotovedenmäärä yksikössä $\text{m}^3/\text{vrk}/\text{patometri}$.



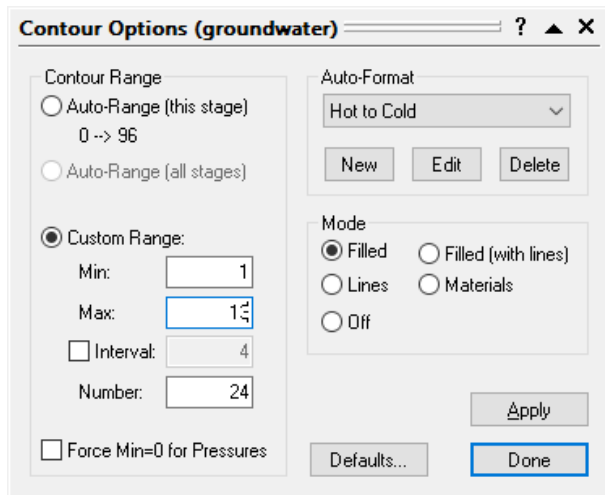
KUVA 13. Tulosten tarkastelutilan eri tietotyypit

Display Options-valikosta voidaan valita mallissa näkyvät tiedot (kuva 14), esimerkiksi vapaan veden esitystapaa voidaan muuttaa Groundwater-välilehden Pondered Water-kohdassa. Tässä tapauksessa oletusvalintojen lisäksi laitetaan näkyviin materiaalien rajat.

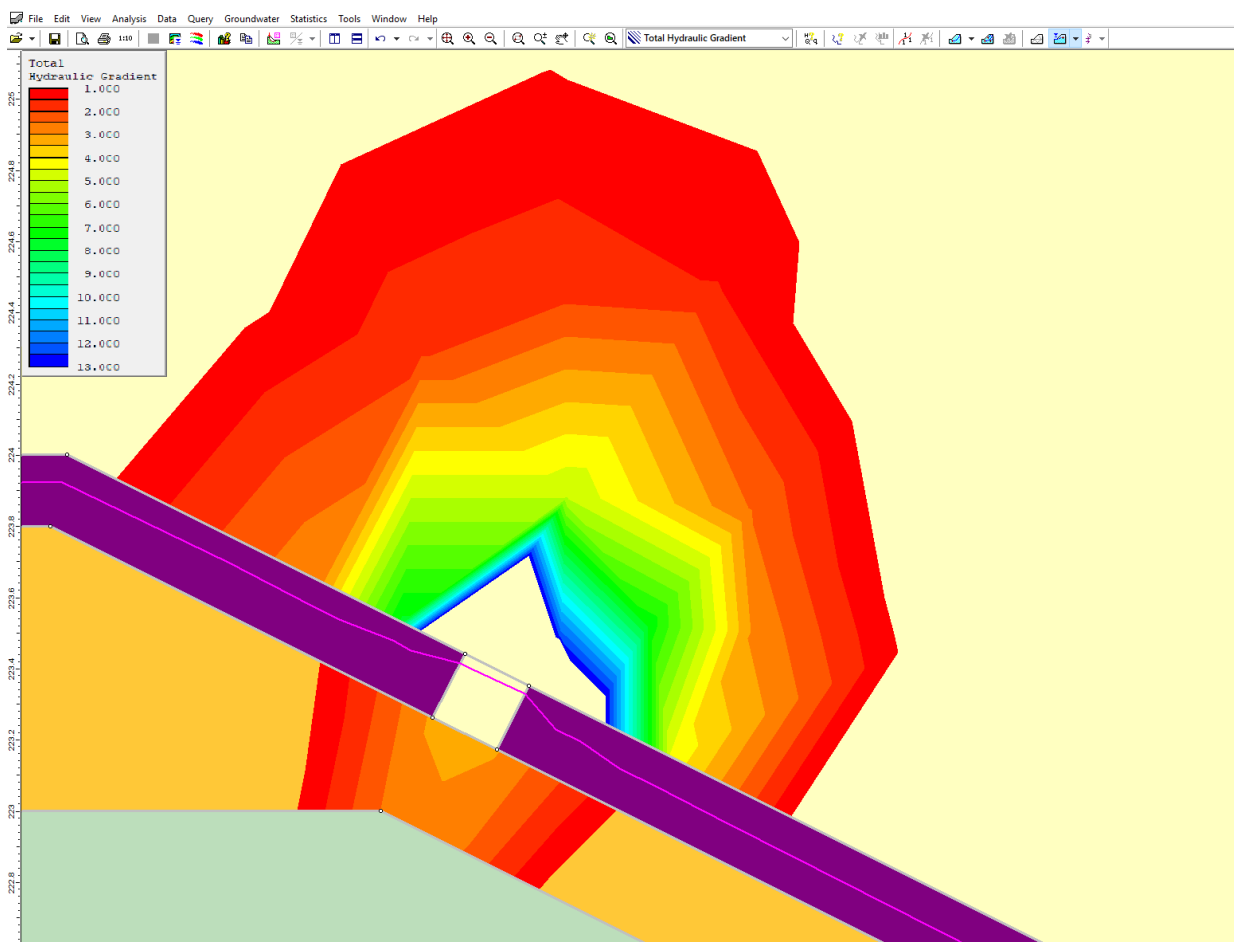


KUVA 14. Mallissa esitettävien tietojen ja niiden esitystavan valinta

Käyritysasteikkoa ja sen esitystapaa voidaan muuttaa Contour Options-valikossa (kuva 15). Valitsemalla Custom Range-kohdan, voidaan asteikon suuruutta tai intervallia muuttaa tilanteen mukaan. 1:stä 13:een yltävä asteikko osoittautuu sopivaksi tässä tapauksessa. Kuvasta 16 nähdään, että tässä tapauksessa kriittinen hydraulinen gradientti $i = 5$ ei ylitä moreenikerroksen ja kiilauskerroksen rajapinnassa.

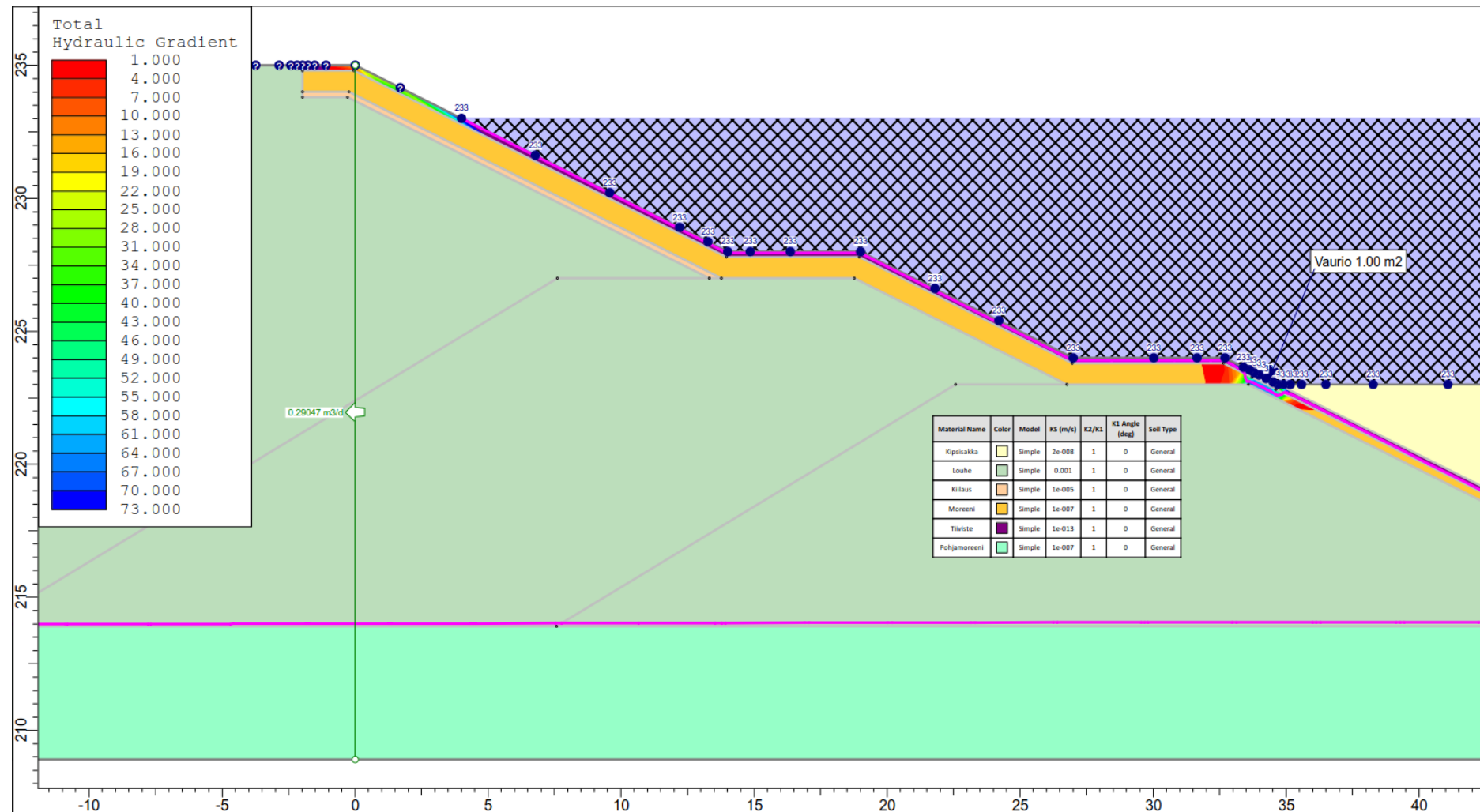


KUVA 15. Käyritysasteikon muuttaminen



KUVA 16. Tiivistevaurion seurauksena muodostunut hydraulinen gradientti

Tarkastelun päätteeksi määritetään tulosteeseen tulevat tiedot. Niitä voivat olla yhteen-
vetotaulukko materiaaleista ja niille asetetuista parametreista, tarvittavia mittoja, selite-
tekstejä ja muuta havainnollistavia tietoja, kuten suotoveden virtausviivat.

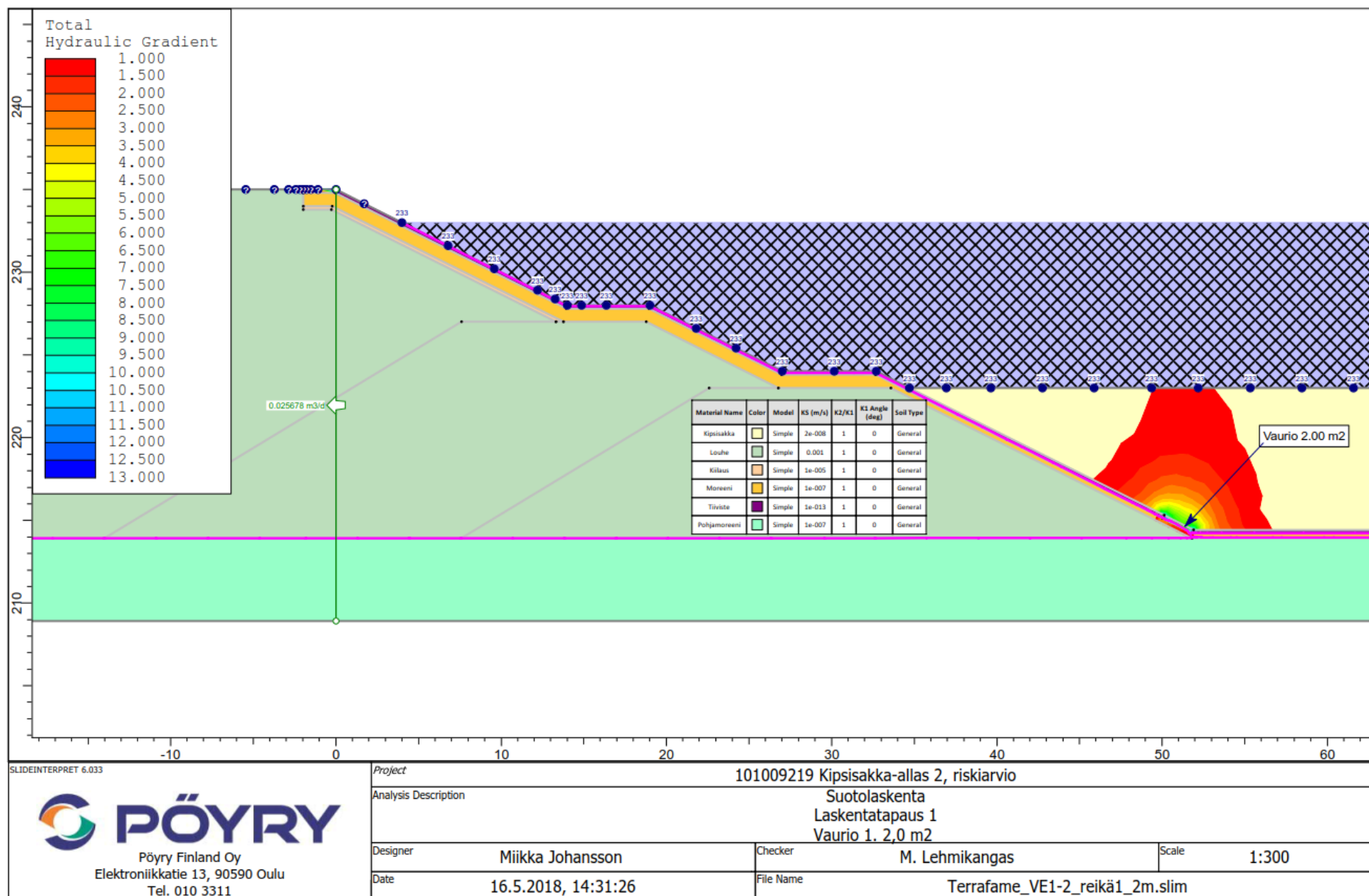


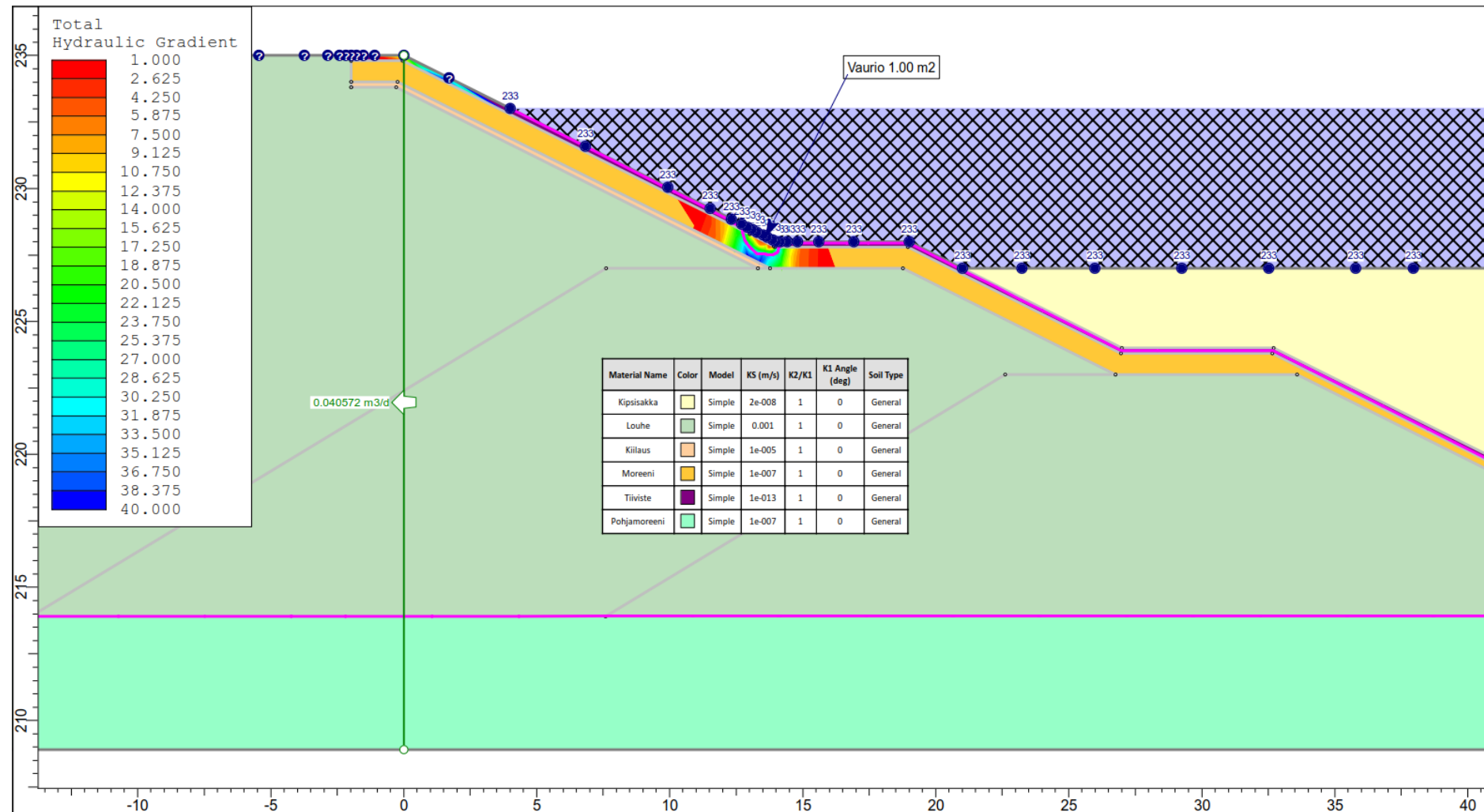
SLIDEINTERPRET 6.033



Pöyry Finland Oy
Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu
Tel. 010 3311

Project		101009219 Kipsiakkaka-allas 2, riskiarvio	
Analysis Description		Suotolaskenta Laskentatapaus 1 Vaurio 4. 1.0 m2	
Designer	Miikka Johansson	Checker	M. Lehmikangas
Date	16.5.2018, 14:31:26	Scale	1:200
File Name		Terraframe_VE1-2_reikä4_1m.slim	





SLIDEINTERPRET 6.033



Pöyry Finland Oy
Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu
Tel. 010 3311

Project 101009219 Kipsisakka-allas 2, riskiarvio

Analysis Description
Suotolaskenta
Laskentatapaus 2
Vaurio 3, 1.0 m²

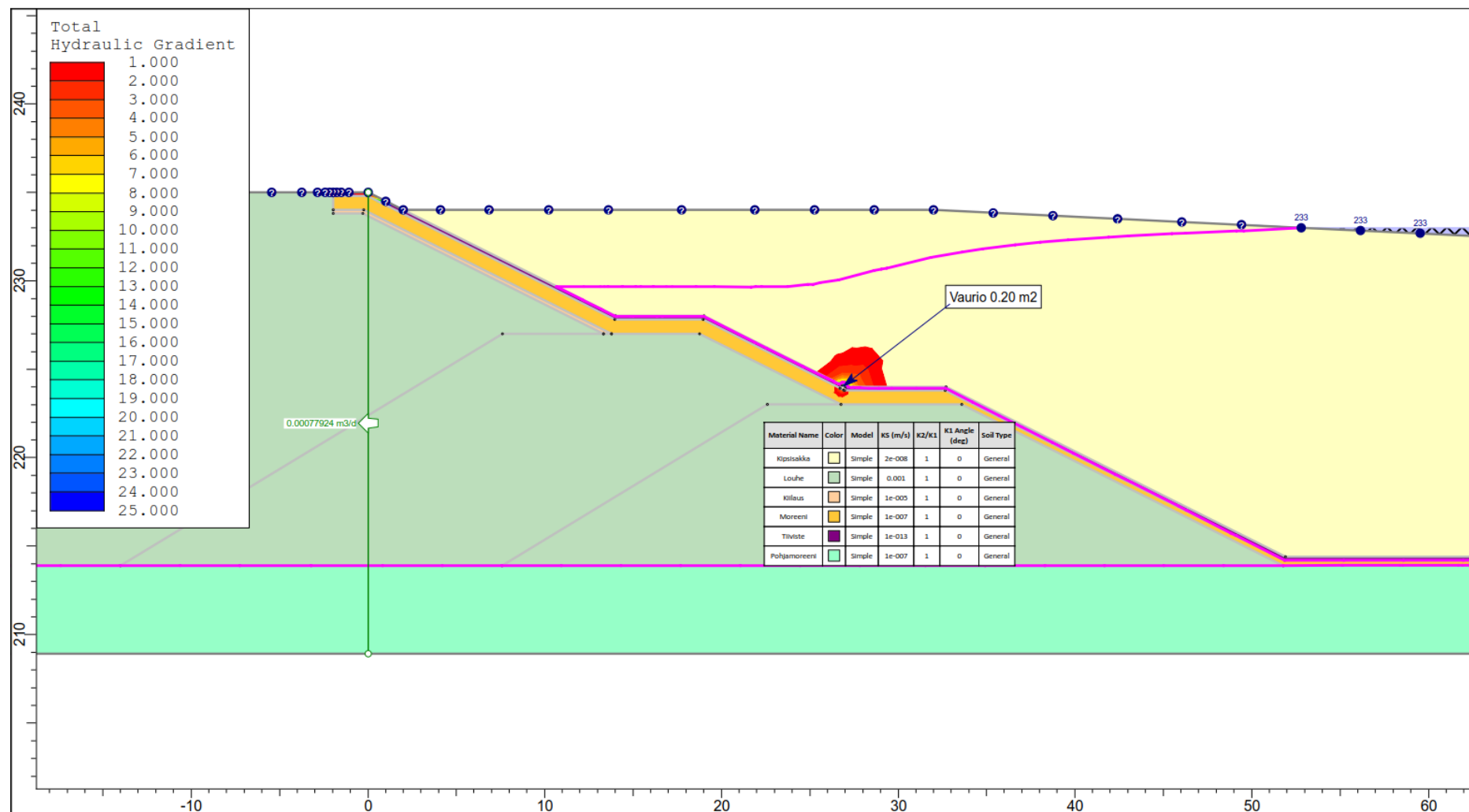
Designer Miikka Johansson

Checker M. Lehmikangas

Scale 1:200

Date 17.5.2018, 6:53:27

File Name Terrafame_VE2-1_reikä3_1m.slim



SLIDEINTERPRET 6.033



Pöyry Finland Oy
Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu
Tel. 010 3311

Project 101009219 Kipsisakka-allas 2, riskiarvio

Analysis Description
Suotolaskenta
Laskentatapaus 3
Vaurio 2. 0.2 m2

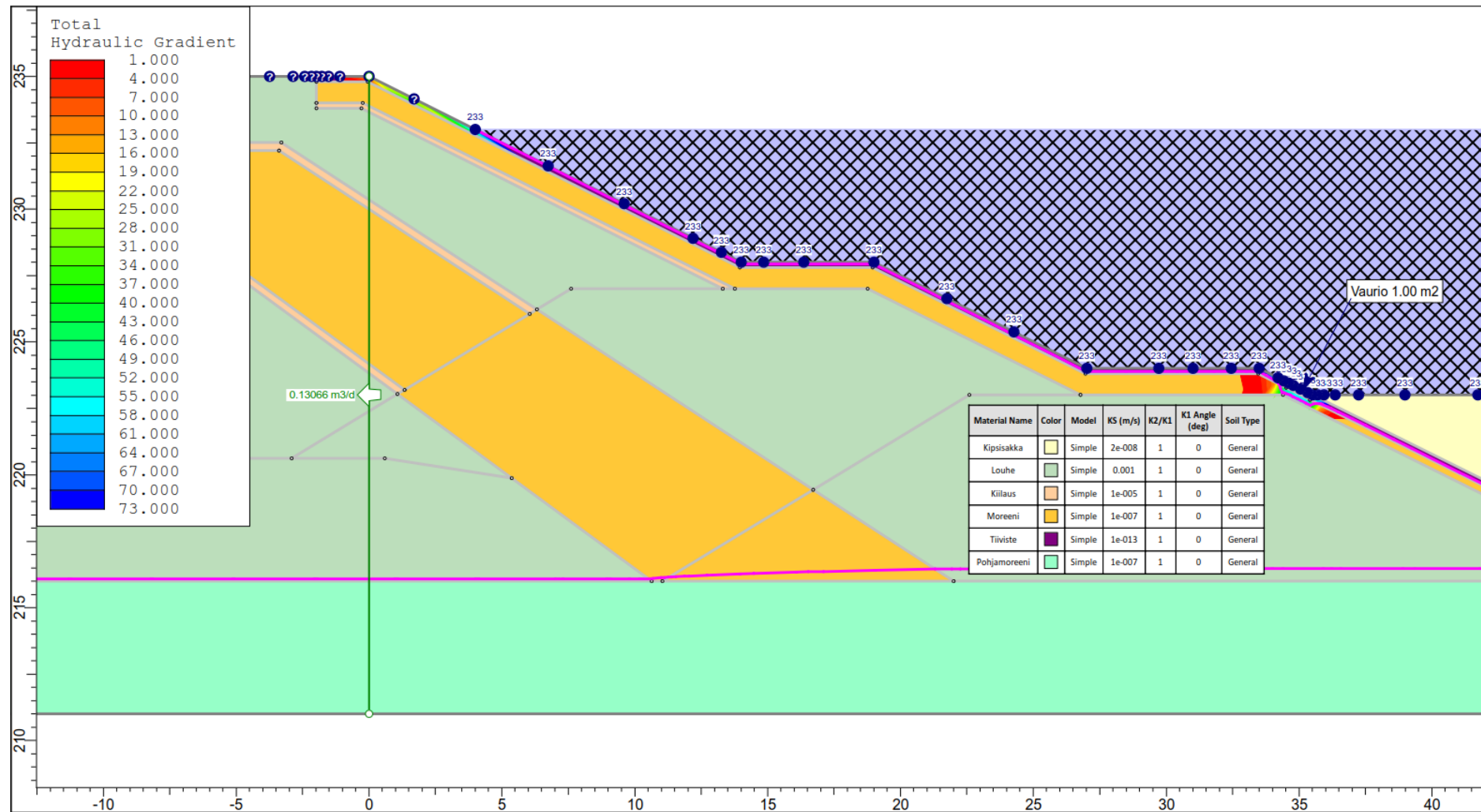
Designer Miikka Johansson

Checker M. Lehmikangas

Scale 1:300

Date 17.5.2018, 7:05:25

File Name Terraframe_VE3-1_reikä2.slim



SLIDEINTERPRET 6.033



Pöyry Finland Oy
Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu
Tel. 010 3311

Project

Kipsisakka 2, riskiarvio

Analysis Description

Suotolaskenta
Laskentatapaus 4
Vaurio 4. 1.0 m2

Designer

Miikka Johansson

Checker

M. Lehmikangas

Scale

1:200

Date

31.5.2018, 14.38.47

File Name

Terraframe_valipato_VE1-1_reikä4_1m.slim